

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA TEXTILNÍ

Obor N3106
Řízení jakosti
Katedra materiálového inženýrství

Vizuální posudky malých barevných rozdílů

The visual assessments of small color differences

Bc. Kateřina Špinková

Vedoucí práce:	Doc. Ing. Michal Vik, PhD.
Konzultant:	Ing. Viková

Počet stran textu:	46
Počet obrázků:	17
Počet tabulek:	5
Počet grafů:	17

P r o h l á š e n í

Byla jsem seznámena s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 - školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědoma povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

V Liberci, dne 11.5.2008

.....

Bc. Kateřina Špínková

Tímto bych chtěla velice poděkovat docentu Vikovi za jeho pomoc, ochotu a odborné vedení při zpracování diplomové práce. Dále za čas a trpělivost všem respondentům, kteří se dobrovolně a ochotně účastnili časově náročného experimentu. A v neposlední řadě mé rodině a přátelům, za jejich pomoc a podporu v době mého studia.

Anotace

Diplomová práce je zaměřena na vizuální hodnocení malých barevných rozdílů.

Práce je rozdělena do dvou základních částí.

První teoretická část je věnována především barevným modelům a systémům hodnocení barevných diferencí. Dále jsou zde uvedeny rovnice pro výpočet barevných diferencí.

Druhá, praktická část, je studie hodnocení barevných rozdílů, tedy vizuální testy, které byly součástí práce pro technický výbor CIE TC1-55 (Rovnoměrný barevný prostor pro hodnocení průmyslové barevné difference). Výsledky vizuálních testů sloužili jako základ porovnání predikčních schopností vybraných rovnic (teoreticky zpracovaných v první části).

Anotation

This thesis work concerns visual assessments of small color differences.
Work includes two basic parts.

The first part includes theory about color models and systems aimed at the assessment of color differences. Describe of the calculation of subjective (visual) and objective color differences of textiles samples is included.

The next practice part is a study of color difference classification – visual tests, which were belong to the work for technical committee CIE TC1-55 (Uniform color space for industrial color difference evaluation). Results of visual testing were engaged as a ground for comparison predication possibility of selected color differences equation.

KLÍČOVÁ SLOVA - KEYWORDS

Barevné difference	Coloured differences
měření barevnosti a vzhledu	measurement of colour and appearance
vizuální hodnocení	visual appreciation
barevné systémy	Colour systems
Farnsworth-Munsell 100 Hue test	Farnsworth-Munsell 100 Hue test
rovnice CIELAB	formula CIELAB
rovnice CMC (1:c)	formula CMC (1:c)
rovnice CIE 1994	formula CIE 1994
rovnice CIE 2000	formula CIE 2000

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

X, Y, Z	trichromatické složky
ΔE	celková barevná difference
$x(\lambda), y(\lambda), z(\lambda)$	hodnoty trichromatických členitelů
k	normalizační faktor
E_λ	činitel poměrného spektrálního složení
R_λ	spektrální činitel odrazu
ΔC^*	odchylka v měrné čistotě
ΔH^*	odstínová odchylka
dV	vizuální odchylka měření – validita
RGB	trichromatický mechanismus
CIE	Mezinárodní komise pro osvětlování
CIELAB	Kolorimetrická soustava CIE $L^*a^*b^*$
CMC.....	Colour Measurement Committee of SDC

Obsah

1. ÚVOD	6
2. REŠERŠNÍ ČÁST	7
2.1. Kolorimetrické soustavy	7
2.1.1. Kolorimetrická soustava XYZ	7
2.1.2. CIELAB	12
2.1.3. Rovnice CMC (1:c).....	16
2.1.4. Rovnice CIE 1994.....	18
2.1.5. CIE 2000	19
2.2. Hodnocení barevných diferencí	22
2.2.1. Subjektivní hodnocení	22
2.2.2. Objektivní hodnocení.....	23
2.3. Měření a posuzování barevnosti.	24
2.3.1. Koloristická skříň nebo spektrofotometr	24
2.3.2. Kalibrace zkušebního přístroje	25
3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	26
3.1. Příprava vzorků.....	27
3.2. Měření vzorků.....	28
3.3. Panel respondentů	29
3.4. Farnsworth -Munsell 100 Hue test.....	30
3.4.1. Obecně o testu.....	30
3.4.2. Testování respondentů	30
3.5. Projekce barevných center	33
3.6. Výsledky	38
3.6.1. T-test	38
3.6.2. Spearmanovy korelační koeficienty.....	39
3.6.3. Analýza rovnic pomocí Pf/3 faktoru	41
3.6.4. Analýza rovnic pomocí korelačního koeficientu	43
4. ZÁVĚR.....	45
PŘÍLOHY	49

1. ÚVOD

Vizuální hodnocení barevných diferencí je velice subjektivní a kolísavé. Závisí na podmínkách pozorování a dalších faktorech (textura, osvětlení, ...). Z tohoto důvodu se stává, že se jednotliví posuzovatelé ve svém hodnocení liší (Hodnocení se mohou dokonce lišit i v rámci jednoho pozorovatele.).

Na průmyslové barvení mají vliv proměnlivé technologické podmínky. Z tohoto důvodu nelze dosáhnout naprosto shodného vybarvení s předloženým vzorkem. Je tedy nutné stanovení tolerančních - mezních hodnot, dle kterých je posuzována kvalita dosaženého barevného odstínu a výrobek přijat či zmítnut. Pro technickou praxi (průmyslovou výrobu) je zcela nezbytné umět popsat, co možná nejjednodušším způsobem, barevné rozdíly mezi dvěma objekty (výrobky).

Od vzniku koloristiky jako vědní disciplíny a popisu barvy pomocí trichromatických složek bylo a je jedním z nejdůležitějších úkolů provést transformaci složek X, Y, Z do takové soustavy, ideálního barevného prostoru, ve které by platilo, že dvě dvojice barevných tónů (např. dvojice modrých a žlutých barev) mají stejnou vizuální odchylku právě tehdy, když takovou odchylku lze vyjádřit i stejným číslem.

Pro potřeby objektivního posouzení míry velikosti barevného rozdílu mezi předlohou (standardem) a vzorkem byla zavedena barevná odchylka ΔE^* (delta E), definovaná na základě diferencí mezi jednotlivými souřadnicemi obou srovnávaných objektů. Za účelem posouzení barevné odchylky jsou barvy umísťovány do virtuálního prostoru, kde v „ideálním“ případě vzdálenost dvou barev (bodů) odpovídá vizuálně vnímané barevné odchylce. Avšak žádný z doposud vytvořených vzorců nevychází z „ideálního“ prostoru, proto nelze dosáhnout ve všech odstínech úplné shody s vizuálním posudkem.

2. REŠERŠNÍ ČÁST

2.1. Kolorimetrické soustavy

2.1.1. Kolorimetrická soustava XYZ

V roce 1931 sešli odborníci na barvy v Mezinárodní komisi pro osvětlování CIE (Commission Internationale de l'Eclairage) a vytvořili barevný prostor XYZ, který byl později rozšířen [1]. Jeho základem byl systém RGB. Tento prostor umožňuje popsat jakoukoliv barvu (dokonce i takovou, kterou nelze namíchat ze třech základních barev), či přesněji vjem z této barvy, pouze dvěma hodnotami. Třetí hodnotou je pak „světlost“ barvy. Vychází ze skutečnosti, že vjem jakékoliv barvy je možné simulovat pomocí tří vhodně zvolených základních světél, při kterém dochází ke sčítání emisních spekter jednotlivých barev. Přes své zjevné nedostatky (je vizuálně nerovnoměrný, tzn. že stejně vnímané barevné odchylky jsou v tomto barevném prostoru interpretovány jako rozdílné vzdálenosti bodů odpovídajících hodnoceným vybarvením) se stal základním referenčním barevným prostorem a všechny ostatní barevné prostory se k němu vztahují [2].

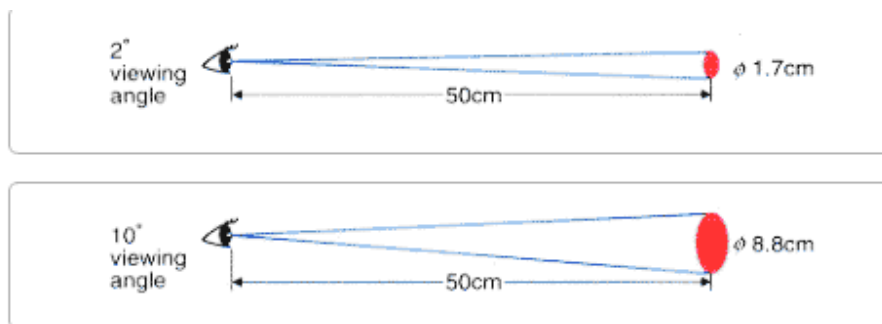
Systém, někdy označovaný také jako trichromatická soustava, je definován hodnotami trichromatických členitelů $x(\lambda)$, $y(\lambda)$, $z(\lambda)$, které byly získány experimentálně. Trichromatické členitele vyjadřují množství červeného, zeleného a modrého stimulu, které je potřeba k simulaci jakékoliv vlnové délky viditelného spektra [3].

V roce 1931 přijala Mezinárodní komise pro osvětlování CIE také pět doporučení, které jsou základem moderního měření barevnosti:

- standardní světla A, B, C
- podmínky osvětlování a pozorování
- standardy odrazivosti
- CIE 1931 standardní pozorovatel 2° definovaný hodnotami \bar{x}_λ , \bar{y}_λ , \bar{z}_λ
- soustava trichromatických složek XYZ

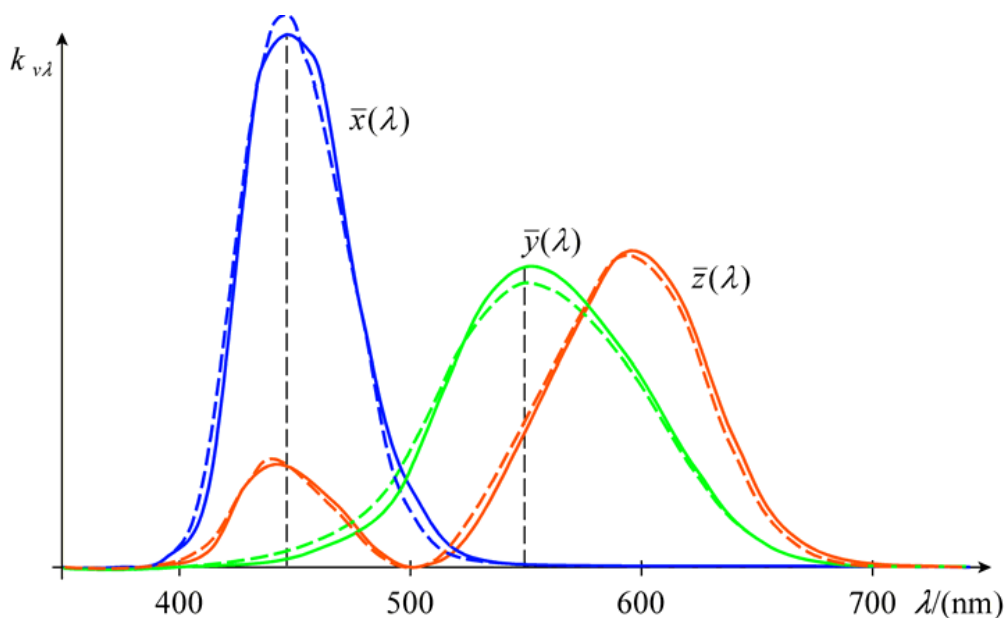
Tato doporučení se postupně upravují a zpřesňují. Např. v roce 1964 byl definován doplňkový standardní pozorovatel pro pozorování pod větším úhlem – tzv.

desetistupňový pozorovatel (obr. 1). V praxi se dnes používá téměř ve všech případech. Dvoustupňový pozorovatel CIE 1931 (obr. 1) je dnes používán pouze ve speciálních případech nebo v návaznosti na dřívější měření [4].



Obr . 1: Úhly pozorování 2° a 10° standardního kolorimetrického pozorovatele CIE

Trichromatičtí členitelé (obr. 2) byly odvozeny pro standardního kolorimetrického pozorovatele CIE. Pro zorný úhel 2° (podmínky foveálního vidění, tzn. vnímání barev pouze žlutou skvrnou oka) a doplňkový standardní pozorovatel, který analogicky používá prostorový úhel 10° [5].



Obr . 2: Funkce standardního kolorimetrického pozorovatele CIE (plně 2°, čárkovaně 10°)

Hodnoty trichromatických složek jsou definovány takto:

$$X = k \int_{\lambda} E_{\lambda} R_{\lambda} \bar{x}_{\lambda} d\lambda \quad (1)$$

$$Y = k \int_{\lambda} E_{\lambda} R_{\lambda} \bar{y}_{\lambda} d\lambda \quad (2)$$

$$Z = k \int_{\lambda} E_{\lambda} R_{\lambda} \bar{z}_{\lambda} d\lambda \quad (3)$$

kde E_{λ} je činitel poměrného spektrálního složení světelného zdroje,

R_{λ} je spektrální činitel odrazu, podle vlnové délky,

$\bar{x}_{\lambda}, \bar{y}_{\lambda}, \bar{z}_{\lambda}$ jsou hodnoty trichromatických činitelů,

k je normalizační faktor daný rovnicí:

$$k = 100 / \int_{\lambda} E_{\lambda} \bar{y}_{\lambda} d\lambda \quad (4)$$

Pro zjednodušení jsou integrály v rovnicích nahrazeny součty a hodnoty součinů $E_{\lambda} \bar{x}_{\lambda}$, $E_{\lambda} \bar{y}_{\lambda}$ a $E_{\lambda} \bar{z}_{\lambda}$ tabelovány (Byla zohledněna normalizační podmínka a tím normalizační faktor k odpadá.) [6]:

$$X = \sum E_{\lambda} R_{\lambda} \bar{x}_{\lambda} \Delta\lambda \quad (5)$$

$$Y = \sum E_{\lambda} R_{\lambda} \bar{y}_{\lambda} \Delta\lambda \quad (6)$$

$$Z = \sum E_{\lambda} R_{\lambda} \bar{z}_{\lambda} \Delta\lambda \quad (7)$$

Trichromatické složky X, Y a Z definují polohu barvy v trojrozměrném kolorimetrickém prostoru CIE XYZ. Pro snazší pochopení a interpretaci této soustavy lze odhlédnout od intenzity příslušného podnětu, neboli ignorovat jas barvy a uvažovat jen její

chromatičnost. Toho je možné dosáhnout normalizací trichromatických složek X, Y a Z. V kolorimetrii se tradičně používá jednoduchá normalizace, která jas odstraní [7]:

$$x_{norm} = \frac{X}{X + Y + Z} \quad (8)$$

$$y_{norm} = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad (9)$$

$$z_{norm} = \frac{Z}{X + Y + Z} \quad (10)$$

Pro tyto normalizované hodnoty platí:

$$x_{norm} + y_{norm} + z_{norm} = 1 \quad (11)$$

Třetí hodnota z_{norm} je pak ovšem v takovém případě nadbytečná a lze ji snadno vyjádřit z ostatních dvou:

$$z_{norm} = 1 - x_{norm} - y_{norm} \quad (12)$$

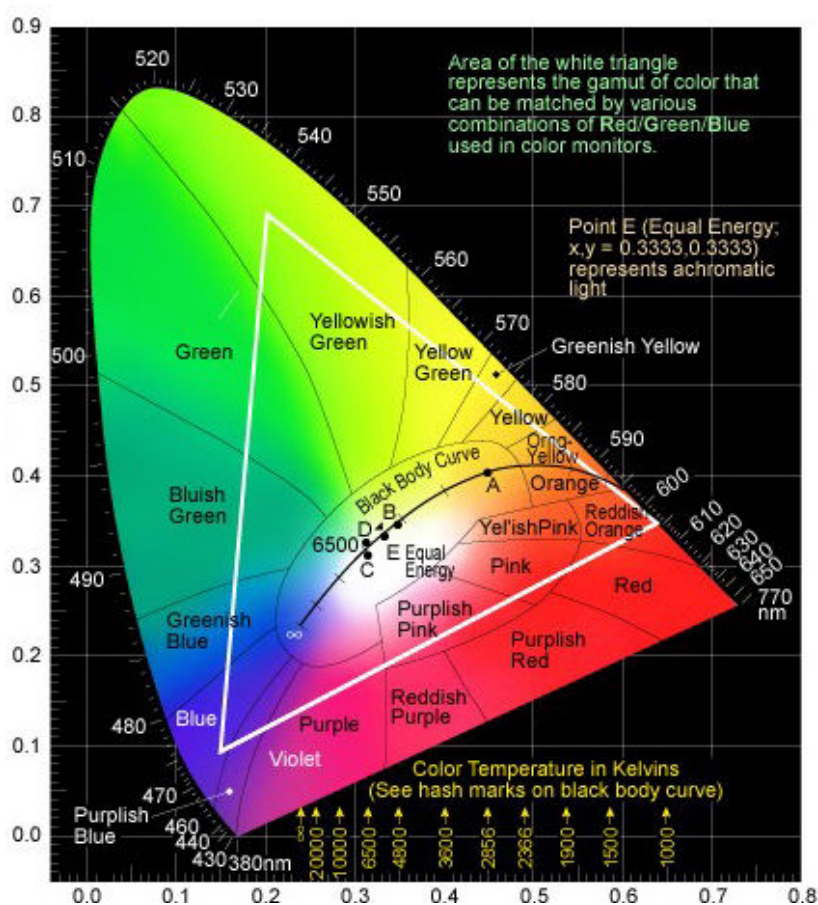
Proto není potřeba ji uvádět a k zachycení chromatičnosti barvy (bez jasu) stačí jen dvě proměnné, x a y [7].

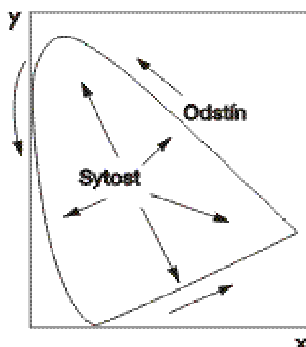
Redukce na pouhé dvě hodnoty umožňuje mimo jiné snadno znázornit řadu věcí graficky. Na geometrické zobrazení barev se tedy využívá rovinný řez kolorimetrickým prostorem – kolorimetrický trojúhelník, diagram chromatičnosti [8].

Pro jednoduchost a názornost se chromatické diagramy často zobrazují v barvách (viz Obr. 3). Obvod podkovy tvoří body odpovídající chromatičnosti čistých spektrálních barev. Čistota (syty) barvy se snižuje směrem ke středu podkovy. Barvy se stejným odstínem leží na přímkách spojující bod, který odpovídá bílé barvě a bod na obvodu podkovy. Naopak barvy ležící v černém prostoru za křivkou spektrálních barev jsou sice definovatelné, ale jsou přitom virtuální, to znamená nejsou fyzikálně realizovatelné [3].

Diagram chromatičnosti barevného prostoru RGB (tzv. gamut) je vymezen trojúhelníkem v jehož vrcholech se nachází základní barvy monochromatických světelných

zdrojů R (700 nm), G (546,1 nm) a B (435,8 nm). Vzhledem k tomu, že každý reálný barevný podnět se skládá z nezáporných světél různých vlnových délek viditelného spektra, tak všechny body, které odpovídají chromatičnosti reálně existujících světelných podnětů, jejichž barvu jsme schopni vidět, leží uvnitř trojúhelníku. Barvy mimo něj nelze vytvořit složením uvedených základních barev. K vytvoření názorné představy je to velmi užitečné, ale je třeba brát v úvahu, že tato označení i barvy v diagramu jsou jen přibližné a svým způsobem v některých situacích i částečně zavádějící [3].





Obr. 3: Kolorimetrický trojúhelník CIE x,y (1931). Barvy jsou pouze přibližné, protože podnět s toutéž chromaticitou se nám jeví pokaždé jinak v závislosti na pozorovacích podmínkách.

Barevný systém CIE 1931 XYZ má velký přínos a mnoho výhod. Je výpočetně nenáročný (při převodu z RGB se pouze násobí maticí), vyhýbá se záporným hodnotám a barvu udává jen ve dvou hodnotách – to je částečně i nevýhodou.

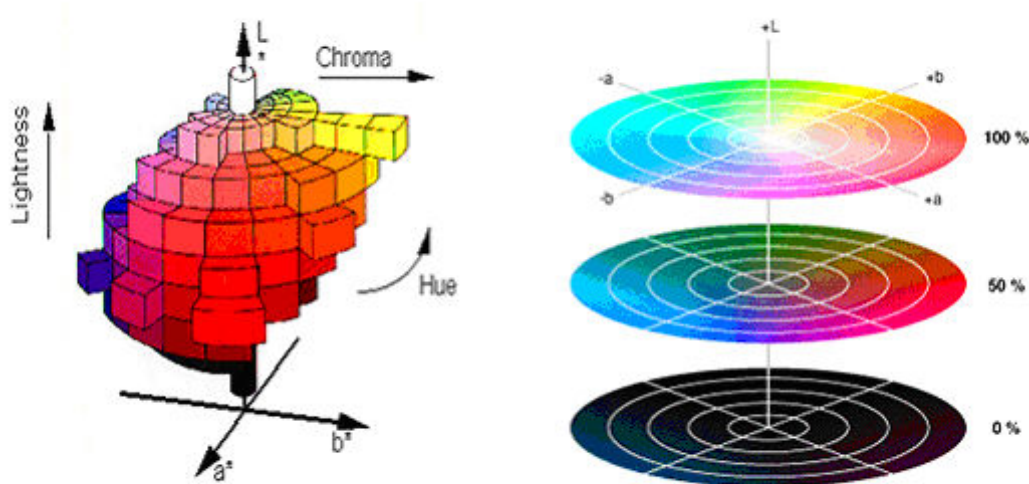
Problémem tohoto barvového systému je skutečnost, že mnoho kombinací souřadnic X a Y nedává žádný smysl. Dále také nesoulad vzdáleností mezi body s vnímáním souvisejících rozdílů barev. To značí, že stejným barevným rozdílům v jeho různých částech neodpovídají stejné vzdálenosti. K řešení tohoto nedostatku jsou používány různé transformace trichromatických souřadnic X, Y, Z [8].

2.1.2. CIELAB

V roce 1976 byl CIE přijat vzorec CIELAB, také označován jako CIE 1976 nebo CIE $L^*a^*b^*$. Tento standardní systém se používá pro měření rozdílů ve vzhledu barev. Hlavní výhodou této rovnice byl snadnější výpočet barevné difference.

Jedná se o tří dimenzionální prostor, který je charakterizován třemi vzájemně kolmými osami L^* , a^* , b^* . Osa hodnot L^* je tzv. osou nepestrosti (jasu), osou černo-bílou, hodnoty souřadnic a^* a b^* charakterizují barevný odstín vzorku a jeho jas.

Měrná čistota barvy určuje vzdálenost od středu chromatické roviny a^*b^* , odstín udává úhel ve stupních v rovině a^*b^* , počátek je na kladné poloose a^* (červená 0°), další poloosy odpovídají následujícím barvám: b^* (žlutá 90°), $-a^*$ (zelená 180°), $-b^*$ (modrá 270°) (viz obr. 4) [8].



Obr. 4: Prostorový model CIE $L^*a^*b^*$.

Základní transformační rovnice tohoto systému pro pravoúhlé souřadnice jsou dány vztahy:

$$L^* = 116(Y/Y_0)^{1/3} - 16, \quad (13)$$

$$a^* = 500[(X/X_0)^{1/3} - (Y/Y_0)^{1/3}], \quad (14)$$

$$b^* = 200[(Y/Y_0)^{1/3} - (Z/Z_0)^{1/3}], \quad (15)$$

kde X_o, Y_o, Z_o jsou trichromatické hodnoty referenční bílé barvy ($X_o = 96,422$; $Y_o = 100$; $Z_o = 82,521$).

jestliže platí, že $X/X_o, Y/Y_o, Z/Z_o > 0,008 856$

pro případ, že $X/X_o, Y/Y_o, Z/Z_o < 0,008 856$ platí linearizace:

$$L^* = 903,3(Y/Y_o) , \quad (16)$$

$$a^* = 3893,5[(X/X_o) - (Y/Y_o)] , \quad (17)$$

$$b^* = 1557,4[(Y/Y_o) - (Z/Z_o)] . \quad (18)$$

Pro cylindrické souřadnice platí vztahy:

$$L^* = 116(Y / Y_o)^{1/3} - 16 \quad (19)$$

$$C^* = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2} \quad (20)$$

$$h^* = \arctg(b^* / a^*) , h \text{ nabývá hodnoty } 0 - 360^\circ, \quad (21)$$

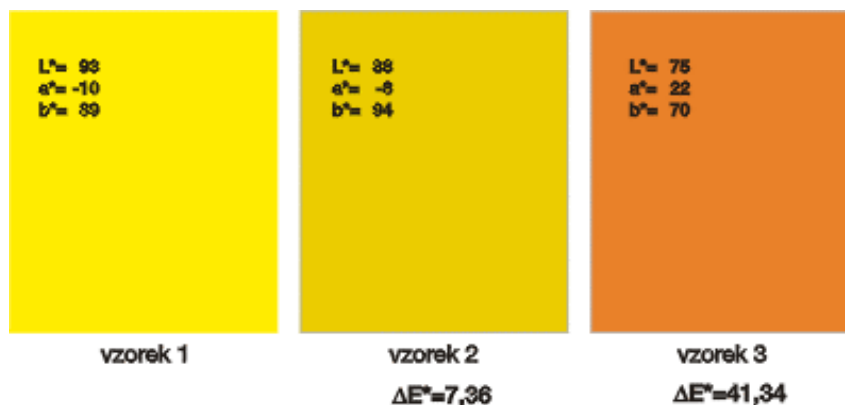
kde C^* je měrná čistota – *chroma* (sytost)

h^* je měrný úhel barevného tónu – *hue* (barevný tón, odstín)

Vzdálenost dvou bodů ΔE^* v tomto prostoru, kterou lze vyčíslit podle vztahu:

$$\Delta E^* = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2} , \quad (22)$$

odpovídá v různých částech prostoru podstatně lépe vizuálně vnímaným rozdílům barevnosti, než analogicky vyčíslená vzdálenost v prostoru CIE XYZ [9].



Obr. 5: Příklad barevné odchylky ΔE

Rozdíl barev ΔE^* představuje důležitou, obecně uznávanou metodu hodnocení rozdílu barev (obr. 5). Podle její velikosti lze hodnotit např. kvalitu monitorů, shodu mezi tisky apod. Pro snadnější orientaci byla stanovena stupnice udávající stupeň neshody dvou barev (tab. 1) [8].

ΔE^*	rozdíl	ΔE^*	rozdíl
0,0 – 0,2	nepostřehnutelný		
0,2 – 0,5	velmi slabý	0,2 – 1,0	postřehnutelný
0,5 – 1,5	slabý	1,0 – 2,0	rozeznatelný
1,5 – 3,0	jasně postřehnutelný	2,0 – 4,0	ještě nerušící
3,0 – 6,0	střední	4,0 – 8,0	mírně rušící
6,0 – 12,0	výrazný		
12,0 – 16,0	velmi výrazný		
Větší než 16,0	rušící		

Tab. 1: Hodnocení odchylek mezi barvami.

Samostatně lze hodnotit i odchylky jednotlivých složek:

$\Delta L^* > 0$ vzorek je světlejší (a naopak),

$\Delta a^* > 0$ vzorek je červenější (a naopak zelenější),

$\Delta b^* > 0$ vzorek je žlutější (a naopak modřejší),

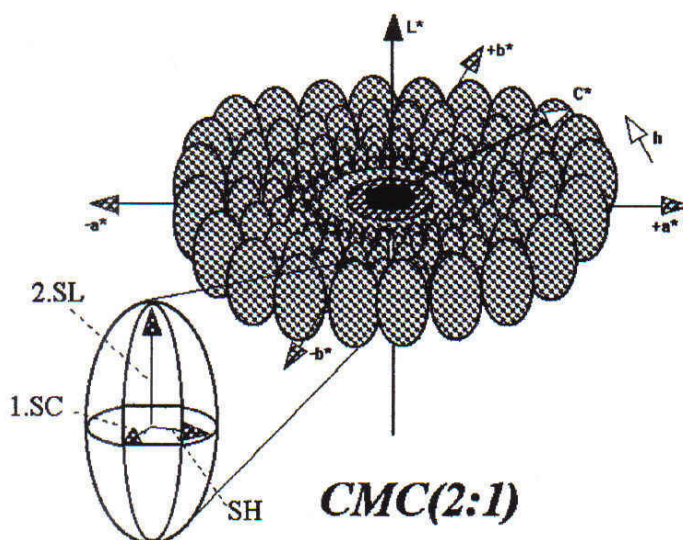
$\Delta C^* > 0$ vzorek je sytější - více chromatický.

Nutno podotknout, že CIELAB není ideálním barevným prostorem. K jeho nedostatkům patří hlavně závislost na síle vybarvení a tím i na měrné čistotě [9]. A také jistá neurčitost definice.

Avšak má významné postavení v technologiích správy barev (Color Management), protože umožňuje spolehlivou archivaci nezkreslených barevných obrazů. Je nezávislý na typu zařízení a proto se používá v modulu správy barev (Color Management Modul) k převodu barev mezi jednotlivými zařízeními (např. tiskárnou a skenerem) [8].

2.1.3. Rovnice CMC (l:c)

Konstruování tolerančních elipsoidů (místo „koulí“), znázorňujících ideální barevný prostor, je dalším stupněm ve vývoji vzorců pro výpočet malých barevných diferencí pro přijatelnost [10]. V roce 1988 byl pro výpočet barevné odchylky navržen vzorec CMC (od roku 1995 platí jako norma ISO 105-J03) [11].



Obr. 6: Toleranční elipsoidy CMC zobrazené v barevném prostoru CIELAB.

Rovnice obsahuje dva volitelné faktory „l“ a „c“ („lightness, chroma“). V textilní praxi se poměr l:c obvykle volí 2:1 (obr. 6), protože lidské oko obecně vnímá větší

barevné difference v jasů („l“) než v sytosti („c“). Toleranční elipsoidy se proto směrem ke spektrálně čistým odstínům zvětšují a naopak. Takto vyjádřená barevná odchylka (ΔE_{cmc}) lépe odpovídá vizuálnímu hodnocení [4], [12].

Významný barevný systém CMC(l:c) je založen na barevných rozdílech CIELAB podle následujících vztahů:

$$\Delta E_{CMC(l:c)} = \left[\left(\frac{\Delta L^*}{l \cdot S_l} \right)^2 + \left(\frac{\Delta C^*}{c S_c} \right)^2 + \left(\frac{\Delta H^*}{S_H} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (23)$$

$$\text{kde} \quad S_L = \frac{0,040975 \cdot L^*}{1 + 0,01765 \cdot L^*} \quad \text{když } L^* \geq 16 \quad (24)$$

$$\text{nebo} \quad S_L = 0,511 \quad \text{když } L^* \leq 16, \quad (25)$$

$$S_C = \frac{0,0638 \cdot C^*}{1 + 0,0131 \cdot C^*} + 0,638 \quad \text{a} \quad (26)$$

$$S_H = S_C \cdot (T \cdot f + 1 - f). \quad (27)$$

S_L , S_C , S_H jsou velikosti poloos toleranční elipsy,

T je funkce užívána pro výpočet velikosti S_H mezi poloosami toleranční elipsy,

L^* , C^* a h jsou barevné hodnoty zvoleného etalonu a

$$f = \left\{ \frac{(C^*)^4}{[(C^*)^4] + 1900} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (28)$$

$$T = 0,36 + |0,4 \cdot \cos(35 + h)| \quad \text{když } h \text{ patří do intervalu } <345^\circ, 164^\circ> \quad (29)$$

$$T = 0,56 + |0,2 \cdot \cos(168 + h)| \quad \text{když } h \text{ patří do intervalu } <164^\circ, 345^\circ> \quad (30)$$

jsou korelační hodnoty vztažené k barvě etalonu (L^* , C^* a h), se kterými posuzovanou barvu porovnáváme [13].

Nedostatkem formule CMC(l:c) je ne zcela přesné vyjádření. Diskriminační elipsy vizuálně vnímaných odchylek nejsou orientovány centrálně vůči neutrálnímu bodu. Řešením je modifikace některých členů rovnice CMC(l:c), čímž vznikne další toleranční vzorec BFD(l:c) [14] nebo BFDA(l:c) [15].

2.1.4. Rovnice CIE 1994

Vzhledem k tomu, že ani vzorec CMC(l:c) není zcela ideální, tak již v době jeho přijetí za standard ISO, byl v rámci CIE diskutován nový vzorec CIE TCI-29. Dnes označován jako CIE 1994 nebo CIE94 ($k_L:k_H:k_C$). Váhové funkce (k_L , k_H , k_C) jsou více založeny na tolerančních datech odvozených z průmyslových experimentů. Pro tvorbu vzorce byl použit, podobně jako u CMC(l:c), model založený na souosém tolerančním elipsoidu. Naopak CMC(l:c) vychází z hyperbolického modelu a CIE94 z lineárního modelu [4]:

$$\Delta E_{CIE1994} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L^*}{k_L \cdot S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C^*}{k_C \cdot S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H^*}{k_H \cdot S_H}\right)^2} \quad (31)$$

kde $k_L = 1$ pro většinu měření,

$k_L = 2$ pro použití vzorce v textilním průmyslu,

$$k_C = k_H = 1,$$

$$S_L = 1,$$

$$S_C = 1 + 0,045 \cdot C^* \text{ a}$$

$$S_H = 1 + 0,015 \cdot C^*.$$

TCI-29 doporučil také výzkum tzv. „adjustačního faktoru“ k_E , který získáme z rovnice pro trichromatické složky (1, 2, 3) [4].

$$\Delta V = k_E \cdot \Delta E_{CIE1994} \quad (32)$$

kde k_E je „adjustační faktor“ a

ΔV je vizuálně vnímaná difference.

TCI-29 zároveň doporučil jakých odstínů by se měly vizuální testy týkat především a za jakých podmínek by měly probíhat [16].

Tato metoda bere v úvahu praktickou zkušenost, že lidské oko snáší u mnoha barevných odstínů větší odchylku v jasů než v sytosti, vnímá barevné difference u kalnějších odstínů více než u brilantnějších, proto se toleranční elipsoidy směrem k nepestrým odstínům zmenšují. Systém CIE94 zohledňuje parametry vnímání zraku tak, aby výsledkem byla shoda se zrakovým ohodnocením [17].

Přínosem rovnice CIE94 je především její jednoduchost.

2.1.5. CIE 2000

Diskuze o vlivu natočení tolerančního elipsoidu na predikční schopnosti rovnic pro výpočty barevných diferencí vedly v roce 2000 k přijetí CIE normy s označením CIEDE2000 [18], [19]. Podle této normy se výpočet barevné odchylky provádí ve čtyřech krocích:

1) Výpočet barevných souřadnic v rámci barevného prostoru CIELAB, který je uveden v kapitole 2.2 (1, 2, 3)

2) Výpočet a' , C' a h' :

$$L' = L^*$$

$$a' = (1 + G) \cdot a^*$$

$$b' = b^*$$

$$C'_{ab} = \sqrt{a'^2 + b'^2}$$

$$h'_{ab} = \tan^{-1}(b'/a')$$

kde

$$G = 0,5 \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{\overline{C_{ab}^*}^7}{\overline{C_{ab}^*}^7 + 25^7}} \right)$$

kde $\overline{C_{ab}^*}$ je aritmetický průměr měrné čistoty C_{ab}^* standardu a vzorku [4].

3) Výpočet $\Delta L'$, $\Delta C'$ a $\Delta H'$

$$\Delta L' = L'_b - L'_s$$

$$\Delta H'_{ab} = 2\sqrt{C'_{ab,b}C'_{ab,s}} \sin\left(\frac{\Delta h'_{ab}}{2}\right)$$

kde

$$\Delta h'_{ab} = h'_{ab,b} - h'_{ab,s}$$

4) Výpočet CIEDE2000 = $\Delta E_{CIE2000}$

$$\Delta E_{CIE2000} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L'}{k_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C'_{ab}}{k_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H'_{ab}}{k_H S_H}\right)^2 + R_T \left(\frac{\Delta C'_{ab}}{k_C S_C}\right) \left(\frac{\Delta H'_{ab}}{k_H S_H}\right)}$$

kde

$$S_L = 1 + \frac{0,015 \cdot (\overline{L'} - 50)^2}{\sqrt{20 + (\overline{L'} - 50)^2}},$$

$$S_C = 1 + 0,045 \cdot \overline{C'_{ab}},$$

$$S_H = 1 + 0,015 \cdot \overline{C'_{ab}} T$$

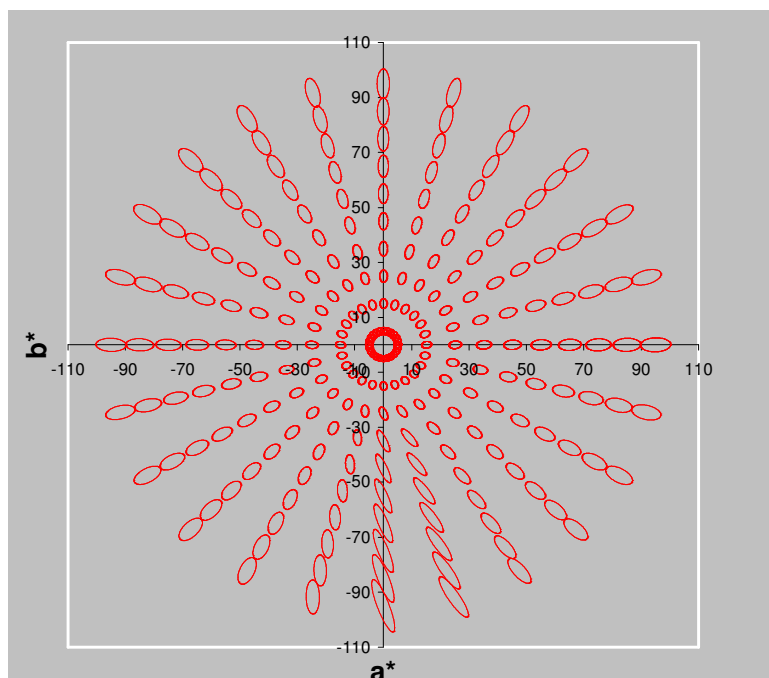
kde

$$T = 1 - 0,17 \cos(\overline{h'_{ab}} - 30^\circ) + 0,24 \cos(2\overline{h'_{ab}}) + 0,32 \cos(3\overline{h'_{ab}} + 6^\circ) - 0,20 \cos(4\overline{h'_{ab}} - 63^\circ)$$

$$R_T = -\sin(2\Delta\theta)R_C$$

kde $\Delta\theta = 30 \exp\left\{-\left[\left(\overline{h'_{ab}} - 275^\circ\right)/25\right]^2\right\}$

$$R_c = 2\sqrt{\frac{\overline{C'_{ab}}^7}{\overline{C'_{ab}}^7 + 25^7}}$$

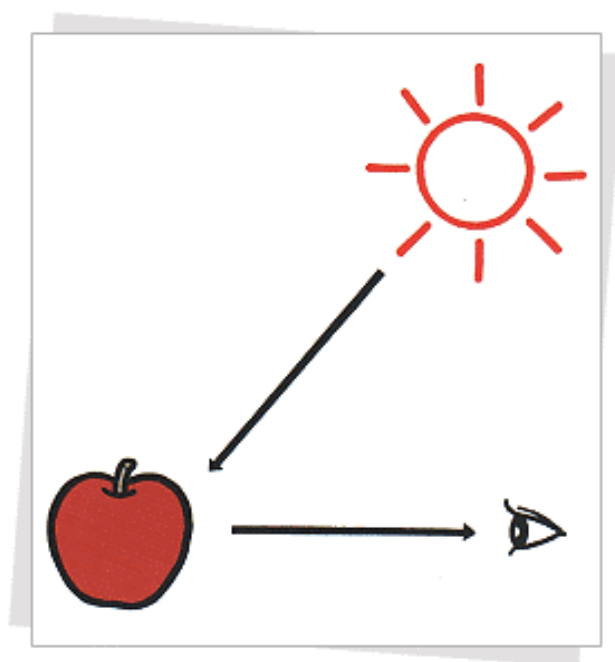


Obr. 6: Toleranční elipsy CIE2000 zobrazené v kolorimetrickém prostoru CIELAB.

ΔE CIE2000 vznikla vylepšením verze modelu CIE94. Obsahuje dodatek vzájemného působení sytosti a odstínu a dává lepší celkovou vjemovou efektivnost [20]. Další výhodou CIE2000 je, že bere v úvahu lidské vidění. Nevýhodou, že neodhaluje metamerismus. Rovnice se tedy používá jen tehdy, když není metamerismus spornou otázkou [21].

2.2. Hodnocení barevných diferencí

Hodnocení barevnosti probíhá vždy jako třístranný systém, což znamená, že na vzniku barevného vjemu se podílí tři základní prvky. Zdroj osvětlení, pozorovaný objekt a pozorovatel (obr. 7).



Obr. 7: Princip vzniku barevného vjemu.

Při každém hodnocení, ať se jedná o subjektivní nebo objektivní, musí být předem definován druh osvětlení a standardní pozorovatel. Bez těchto údajů jsou následné hodnoty bezcenné.

2.2.1. Subjektivní hodnocení

Lidské oko je schopno rozeznat přibližně 6500 individuálních odstínů, ale každého jednotlivce je rozlišovací schopnost odlišná.

Vizuální hodnocení je psychofyzikální proces, proto je vnímání a interpretace výsledku velmi subjektivní. Barevné vnímání pozorovatele ovlivňuje řada faktorů, jako je psychický i fyzický stav pozorovatele (věk, pohlaví, únava očí atd.), úhel pozorování, osvětlení, pozadí, nestálost barevných standardů a stupnic, prostorová distribuce vzorku,

jeho velikost nebo textura. V podstatě není možnost zajistit dlouhodobé optimálně standardní podmínky pozorování [22]. Ani školený pozorovatel není úplně spolehlivý ve svém posudku barevných diferencí. Proto není vizuální hodnocení barevných diferencí spolehlivým zdrojem informací o přesném charakteru získaného vybarvení nebo jeho změn.

Pro tyto negativní vlivy se stále častěji nahrazuje subjektivní hodnocení hodnocením objektivním.

K dodržení odstínových tolerancí se v průmyslu používají pomocné, již dříve akceptované referenční vzorky (standards). Standards je možné je přemísťovat a při párovém srovnávání s neznámým vzorkem lze určit, jak se s ním barevně shoduje. Standardem může být *předloha* (zpravidla jeden vzorek textilního materiálu obarvený na zákazníkem požadovaný odstín), *standardní řada* (většinou koncentrační sled vybarvení typového barviva) nebo atlas barev (systematický soubor úzce odstupňovaných vzorků barev) [11].

V praxi se uplatnily čtyři systémy uspořádání barev do souboru trojúhelník barev, Ostwaldův systém, Munsellův systém, systém DIN 6164 [11].

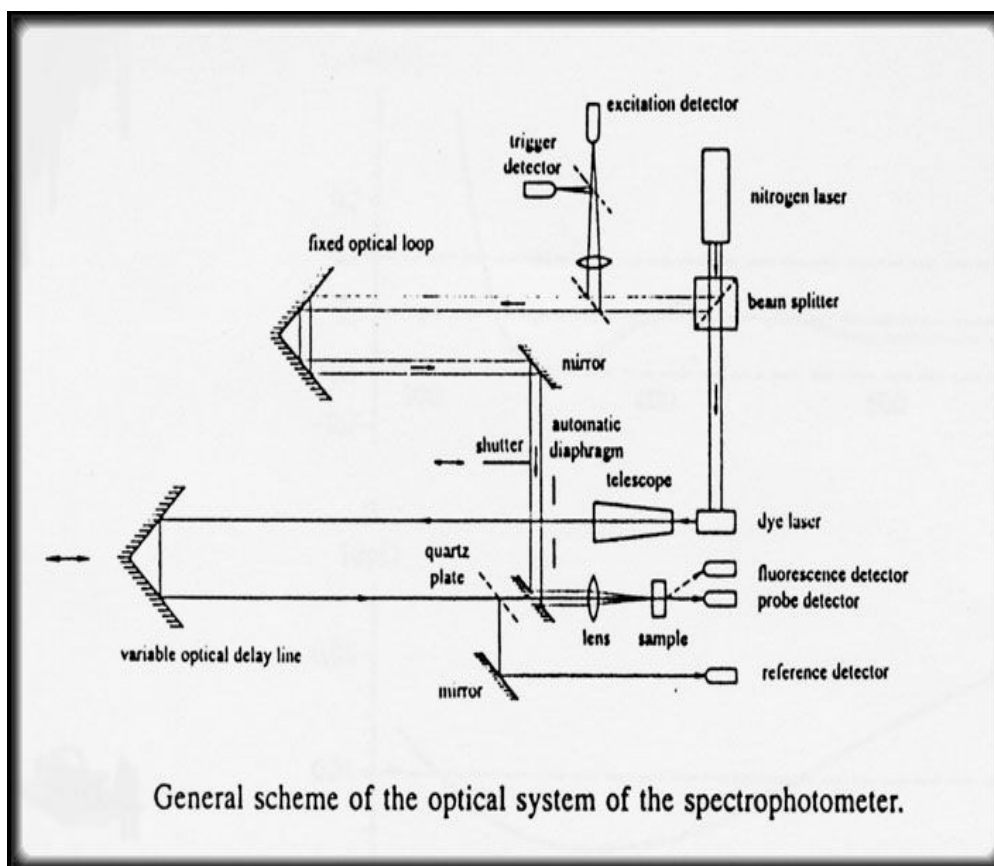
2.2.2. Objektivní hodnocení

Objektivní měření barevnosti se provádí na spektrofotometrech. Principem je měření spekter optického záření a zaznamenání poměru intenzity záření absorbovaného měřeným vzorkem a intenzity referenčního záření v závislosti na vlnové délce záření dopadajícího na vzorek (obr. 8).

Každý spektrofotometr se skládá v podstatě z fotometru a monochromátoru. Měřený předmět je osvětlen intenzivním zdrojem světla (elektrická žárovka s wolframovým vláknem - viditelná oblast, vodíková výbojka - ultrafialová oblast a Nernstova tyčinka nebo různé zářiče - infračervená oblast. Část světelného záření se odráží zpět od měřeného vzorku a je zachyceno optickou částí spektrofotometru. Toto záření je rozloženo na jednotlivé vlnové délky ve viditelné oblasti spektra. Intenzita záření na jednotlivých vlnových délkách je zaznamenána polovodičovým detektorem.

Údaje z detektoru jsou pak softwarově zpracovány tak, aby bylo možné každou barvu popsat pomocí tří souřadnic jako bod v trojrozměrném barevném prostoru. Přesnost měření je do jisté míry ovlivněna příprava vzorku. Současné

spektrofotometry jsou registrační, tzn. v několika minutách zakreslí automaticky celé absorpční spektrum [23].



Obr. 8: Schéma optického spektrofotometru

2.3. Měření a posuzování barevnosti.

Při praktickém měření se ukazuje, že vedle samotné kvality rovnic pro výpočty barevných diferencí má velký vliv na měření i metodika a podmínky měření.

2.3.1. Koloristická skříň nebo spektrofotometr

Obě metody se vzájemně doplňují. V koloristické skříni je ihned zřejmý výsledek. Koloristická skříň k tomu vytváří referenční prostředí pro pozorování. Barvy, které se shodují v místnosti pod umělým osvětlením mohou vypadat na denním světle zcela jinak. Pozorovatel v koloristické skříni rychle a snadno odhalí barevné vady.

Nejdůležitější pro vizuální pozorování v koloristické skříni je zdroj denního světla označovaný nejčastěji jako D65.

Přesné pozorování barev pomocí koloristické skříně je nezbytné vedle textilního průmyslu v mnoha dalších oborech, např. v automobilovém průmyslu, při výrobě a zpracování barev, laků, metalíz, plastických hmot, tiskařských barev apod. Celosvětovým referenčním standardem je koloristická skříň SpectraLight III.

Spektrofotometr vyjádří barevné difference a barvu pomocí čísel. Při dodržení shodné metodiky měření je možné barevné odchylky velmi dobře zdokumentovat.

Zdroj světla ve spektrofotometru musí mít vysokou intenzitu světla na všech vlnových délkách ve viditelném spektru. Uvedený požadavek nejlépe splňuje pulzní xenonová výbojka. Její použití je základním předpokladem pro spolehlivé měření všech typů barevných odstínů.



Obr. 9: Koloristická skříň

2.3.2. Kalibrace zkušebního přístroje

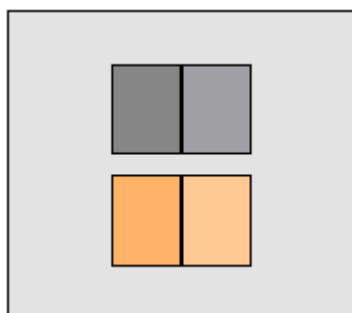
Před začátkem měření musí být provedena kalibrace měřícího přístroje určená výrobcem a poté musí být v pravidelných intervalech prováděna kontrola zkušebního přístroje znovu. Na kvalitě kalibrace je závislá přesnost měření. Proto je důležité udržovat kvalitu a čistotu kalibračních standardů.

3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Tento experiment spočívá ve vizuálním posuzování malých barevných rozdílů z objektivního a subjektivního hlediska, jel součástí práce pro technický výbor CIE TC1-55 Uniform color space for industrial color difference evaluation. Experiment byl prováděn s vybavením a za spolupráce s katedrou textilních materiálů v Laboratoři měření barevnosti a vzhledu Technické univerzity v Liberci.

Metodou párového srovnávání (Obr. 10) bylo panelem respondentů posuzováno celkem 72 vzorků ve třech různých barvách (béžová, oranžová, modrá). Pozorování provádělo 21 hodnotitelů, z toho 8 mužů a 13 žen, ve věku od 10 do 77 let. Úkolem hodnotitelů bylo posoudit barevné difference postřehnutelné mezi standardem a jednotlivými vzorky. Každý respondent prováděl vizuální porovnávání sady vzorků s předem stanovenými barevnými standardy celkem 5 krát, což představuje celkem 7560 individuálních posudků barevných odchylek. Odstup mezi jednotlivými sadami posudků jednoho hodnotitele byl minimálně jeden den.

Posuzování bylo prováděno v koloristické skříni GRETEG Macbeth The judge pod osvětlením D65, pod zorným úhlem cca 10°, s použitím geometrie měření 0/45° a pomocí standardizované šedé stupnice (ISO 105-A02:1993). Podle této šedé stupnice pozorovatelé hodnotili barevnou odchylku mezi standardem a souborem vzorků pěti stupni (5 = žádná difference, 1 = velmi velká difference).



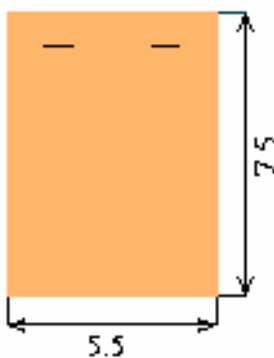
Obr. 10: Schéma umístění vzorků a šedé stupnice při vizuálních testech

3.1. Příprava vzorků

Vybraný soubor vzorků byl připraven v LCAM KTM. Testovaným materiálem byla bavlněná tkanina utkaná v plátňové vazbě a ve třech různých barevných variantách (béžová, oranžová, modrá) o rozměru 7,5 x 5,5 cm (Tab. 2, Obr. 12). Tkanina byla barvena v rozmezí let 2001 až 2006. Všechny vzorky byly na zadní straně označeny typem, číslem výpadu a datem, kdy byl kus obarven. (např. DOMESTINO 821 1031 10.10.2005).

Barva	Č. standardu	Počet vzorků v souboru
Béžová	8211031	35
Oranžová	2622031	16
Modrá	5487022	21

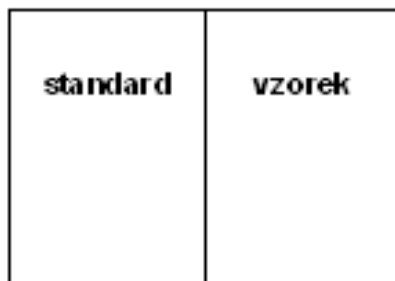
Tab. 2: Přehled označení a počtu vzorků



Obr. 12: Schéma vzorku

Aby nedošlo k chybám měření, způsobeným prostupem světla vzorkem a k chybám vzniklým měřením podkladového materiálu musí být vzorek dostatečně velký a složený do několika vrstev. Z tohoto důvodu byl každý hotový sešitý vzorek složen alespoň ze třech vrstev tkaniny, které byly připnuty k tvrdé papírové podložce – neutrální (šedý) karton. Na jeho zadní straně byly uvedeny identifikační údaje daného vzorku. Aby nedocházelo k tzv. „gap efektu“, při kterém je mezi porovnávanými vzorky

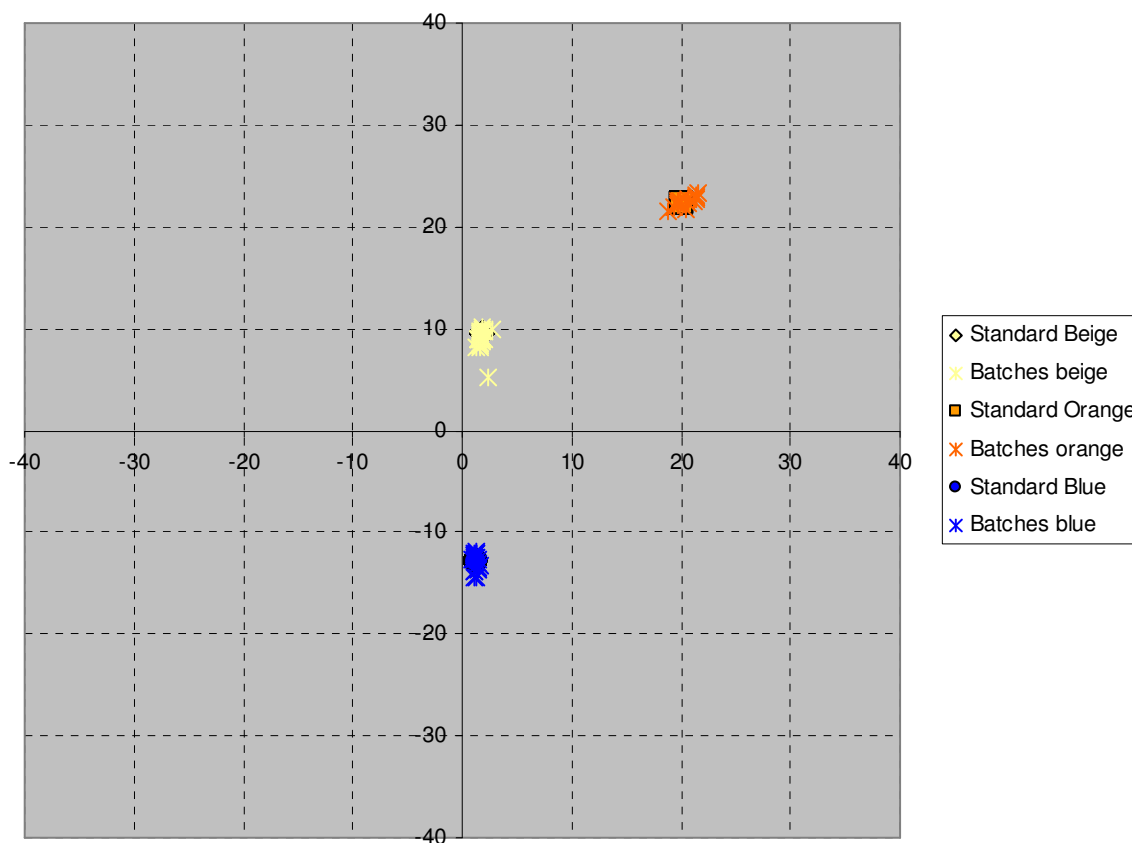
mezera nebo linka a dochází k tomu, že oko automaticky vidí vzorky jako rozdílné, byly vzorky položeny těsně vedle sebe (Obr. 13).



Obr. 13: Schéma umístění vzorků při vizuálních testech

3.2. Měření vzorků

Připravené vzorky byly změřeny na spektrofotometru Spektraflash 300 s měřicí aperturou LAV (20mm). Měření bylo provedeno s 90-ti stupňovou rotací vzorků čtyřikrát. Z výsledků měření byly vypočteny průměrné hodnoty kolorimetrických parametrů a z vypočtených hodnot byly poté stanoveny barevná centra (standardy) a seřazeny ostatní vzorky. U všech tří standardů se jedná se o relativně kalné odstíny, což je důvodem těchto výsledků (graf 2).



Graf 1: Projekce barevných center na chromatickou plochu CIELAB barevného prostoru

3.3. Panel respondentů

Pro individuální hodnocení barevných diferencí bylo důležité zajistit reprezentativní soubor hodnotitelů (se stejnou úrovní barvocitu). To se zcela nepodařilo, oslovení hodnotitelé byli z různých věkových skupin a měli různé úrovně barvocitu. Vybráno bylo 21 pozorovatelů. Barevné odchylky hodnotilo 8 mužů a 13 žen ve věkovém rozpětí 10 až 77 let. Pro roztržidění pozorovatelů do jednotlivých skupin podle úrovně barvocitu byl použit Farnsworth -Munsell 100 Hue test.

3.4. Farnsworth -Munsell 100 Hue test

3.4.1. Obecně o testu

Tento test odhadne špatné vidění respondenta a zároveň rovnou určí, v jaké barevné oblasti je vidění defektní. V tomto testu může dojít k vedlejším jevům, které mohou ovlivnit hodnocení. I přes tyto okolnosti se test jeví jako relevantní [24].

Jedním z nedostatků je, že si respondent může při vyhodnocování testu jakýmkoliv způsobem stítnit. Odstín pak jednoduše zařadí na jiné místo než kam patří. Pro lepší vyhodnocení se testy několikrát opakují [24].

Farnsworth-Munsell 100 Hue test je navržený k měření subjektivní schopnosti správně rozlišit mírně se lišící odstíny. Následkem toho, se spolu s dalšími psycho-fyzikálními úkoly používá pro rozlišování dalších ukazatelů [24].

Předpoklad testu: každý odstín má svou vlastní proměnnou x (ačkoliv barevný prostor je trojrozměrný). To znamená, že tento prostor je jednorozměrný. Rozdělení je pouze pro usnadnění. Pro každé x_i je přidělena náhodná proměnná, které v součtu dají Gaussovu distribuci. Hodnoty jsou určeny nezávisle pro každý odstín. Směrodatná odchylka je také nezávislý parametr. Odstíny v každé ze čtyř pouzder jsou seříděny ve vzestupném pořadí [24].



Obr. 14: Farnsworth – Munsell 100 Hue Test

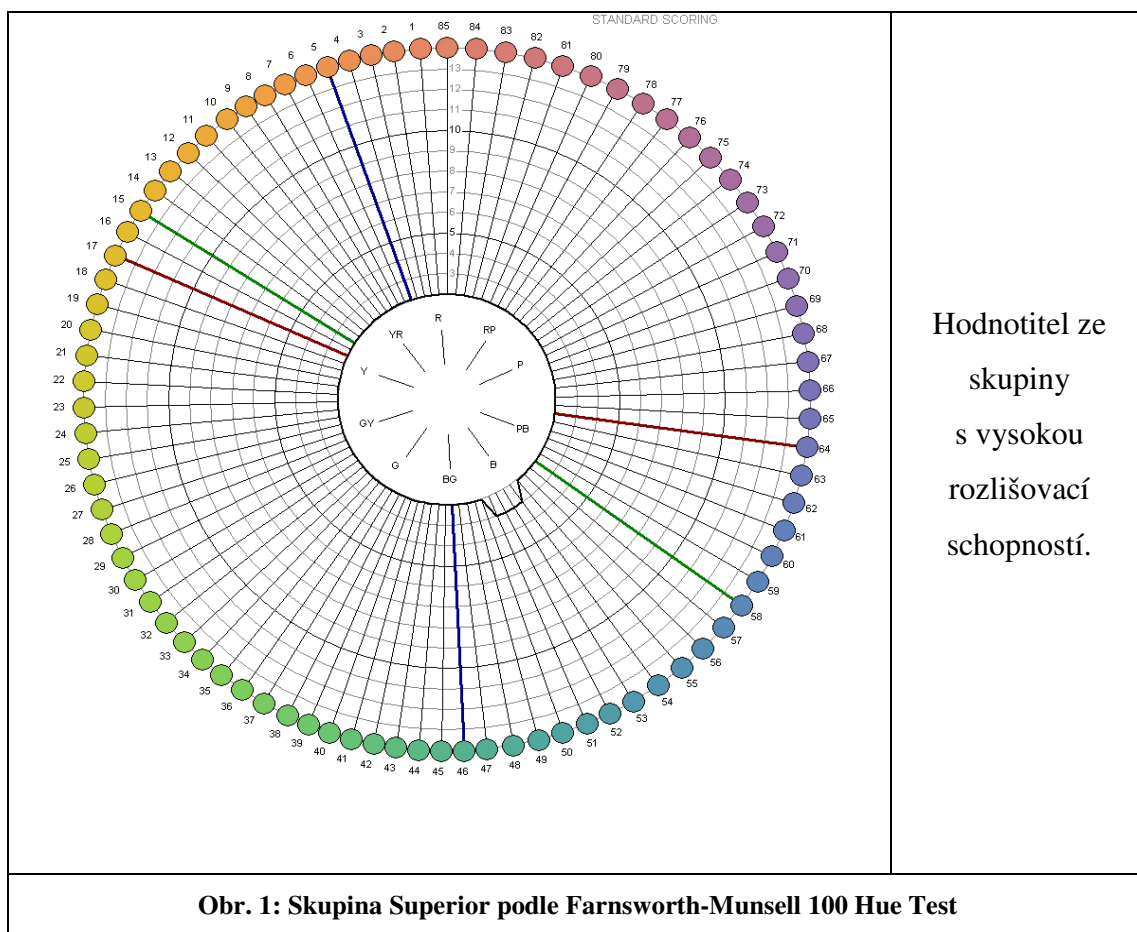
3.4.2. Testování respondentů

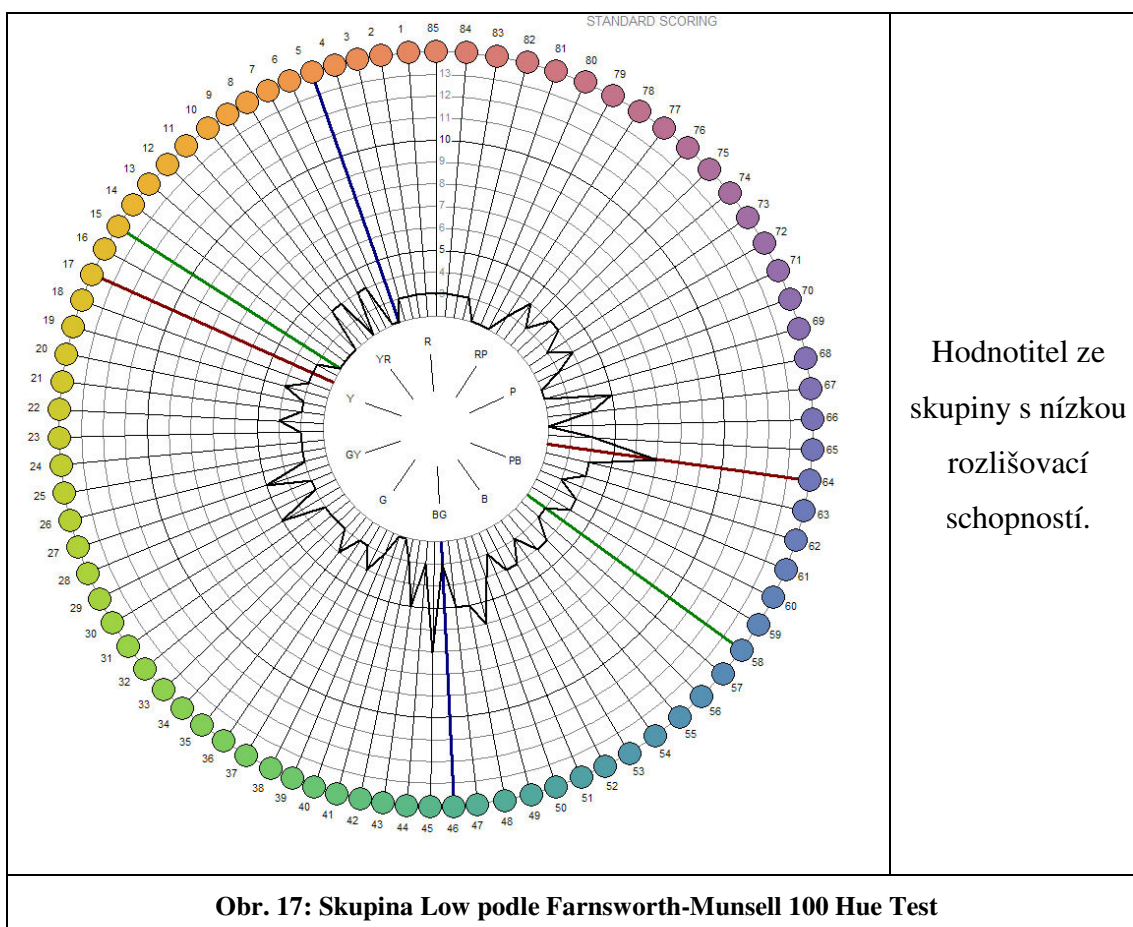
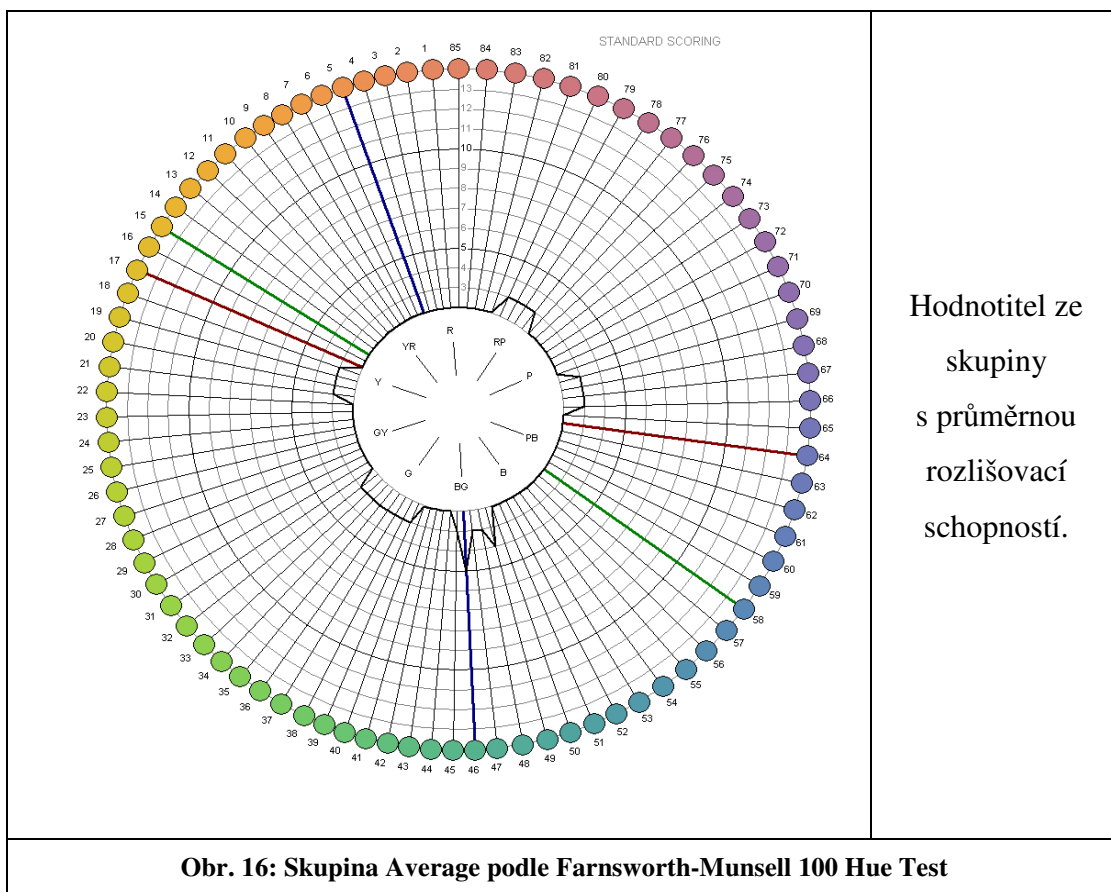
Pomocí Farnsworth-Munsell 100 Hue testu jehož výsledkem je určení vad barvocitu. Test pobíhal následovně: každý z pozorovatelů hodnotil v koloristické skříní

MULTILIGHT pod simulátorem osvětlení D65 tři různé řady barevných vzorků. Podle chyb byl počítačovým programem zařazen do příslušné skupiny. Na základě testu byli pozorovatelé podle rozlišovací schopnosti rozděleni do následujících tří skupin: vynikající rozlišování, průměrné rozlišování a nízké rozlišování (graf 2):

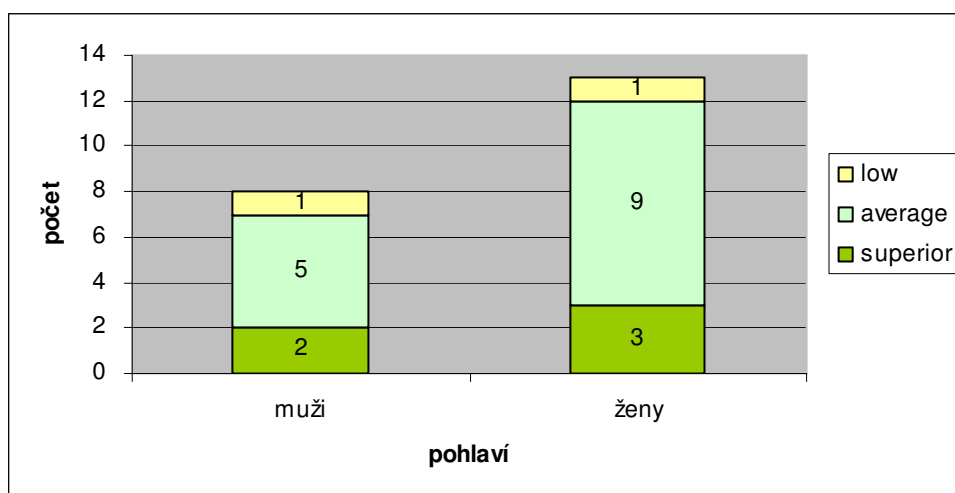
- **Superior** – respondenti s nejlepší rozlišovací schopností barevných rozdílů (5 pozorovatelů – 3 ženy a 2 muži),
- **Average** – respondenti s průměrnou rozlišovací schopností barevných rozdílů (14 pozorovatelů – 9 žen a 5 mužů),
- **Low 1, Low 2** – respondenti s nízkou rozlišovací schopností barevných rozdílů (2 pozorovatelé – 1 žena a 1 muž), přičemž byl každý vyhodnocen zvlášť.

Pro názornost jsou uvedeny obrázky polárních diagramů výsledků Munsellova testu vybraných pozorovatelů:





Na všech grafech je zvýrazněná černá růžice, která je umístěna ve středu. Tato křivka znázorňuje nesprávně určené pořadí barev. Z grafů je také patrné, že čím více se křivka vychyluje od středu, tím má pozorovatel horší rozlišovací schopnosti. Názorným příkladem jsou grafy pozorovatelů ze skupiny s nízkou rozlišovací schopností (graf 20, 21 viz. Příloha 1).

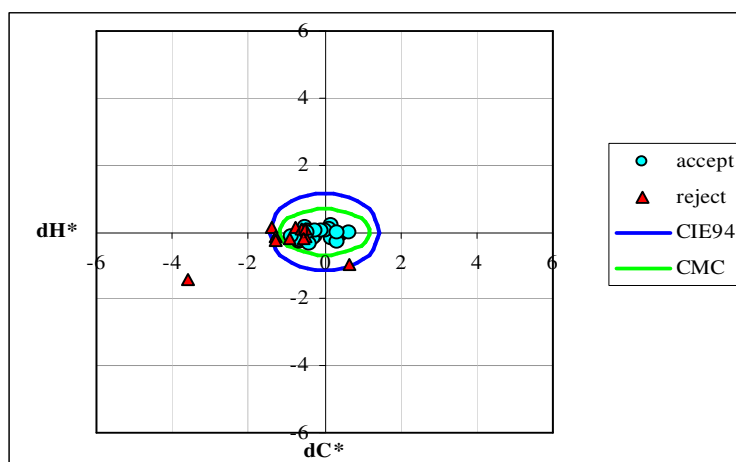


Graf 2: Rozdělení pozorovatelů do skupin dle Farnsworth – Munsell 100 Hue Testu

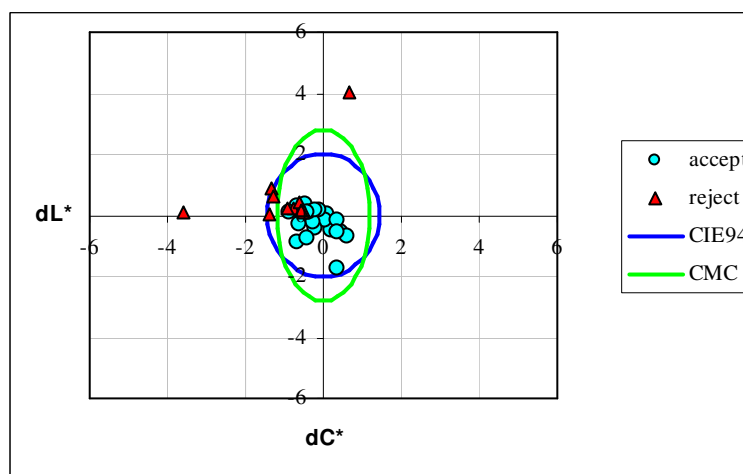
Z grafu je patrné, že největší zastoupení měla s počtem 14 respondentů skupina AVERAGE, což není zcela optimální. Pro experiment by bylo ideální, kdyby měla nejširší zastoupení pozorovatelů skupina SUPERIOR.

3.5. Projekce barevných center

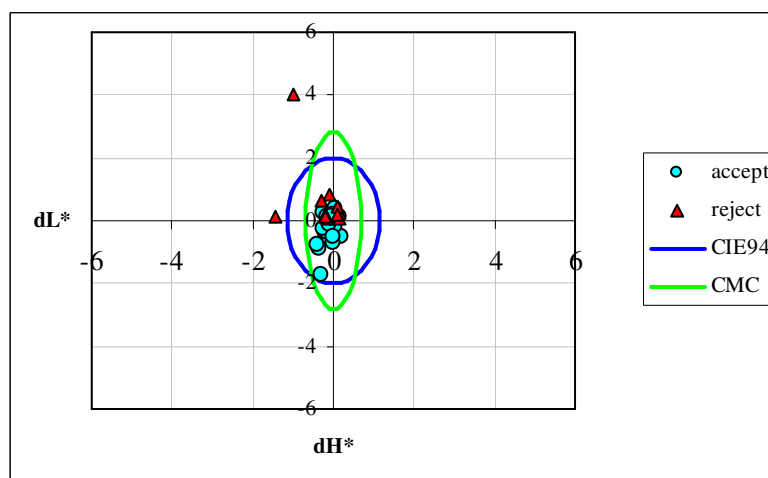
Na následujících grafech č. 3 až 14 (a na grafech z Přílohy 2) můžeme vidět ukázky relací mezi jednotlivými barevnými centry (béžová, oranžová, modrá) a rovnicemi CIE1994 (2:1:1) a CMC (2:1) zobrazených na chromatické H^*C^* ploše, na ploše L^*C^* a L^*H^* ploše. Každé barvě odpovídají čtyři grafy (béžová: 3-6, oranžová: 7-10 a modrá 11-14), přičemž grafy č. 6, 10 a 14 zobrazují relace mezi daným barevným centrem a rovnicí DIN99. V grafech jsou akceptovatelné vzorky zakresleny jako modré kolečko a neakceptovatelné jako červený trojúhelník. Zajímavé je, že podle dosažených výsledků dopadla nejhůře rovnice CMC a CMC(1:2).



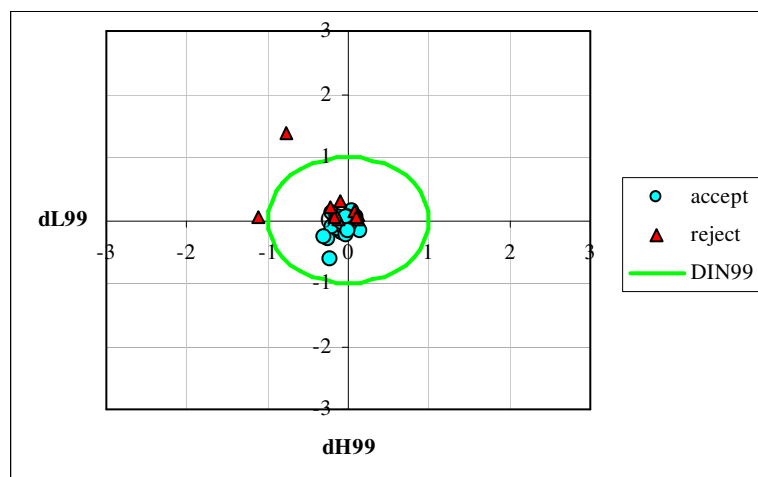
Graf 3: Toleranční elipsy pro béžové vzorky s osami dH^* a dC^*



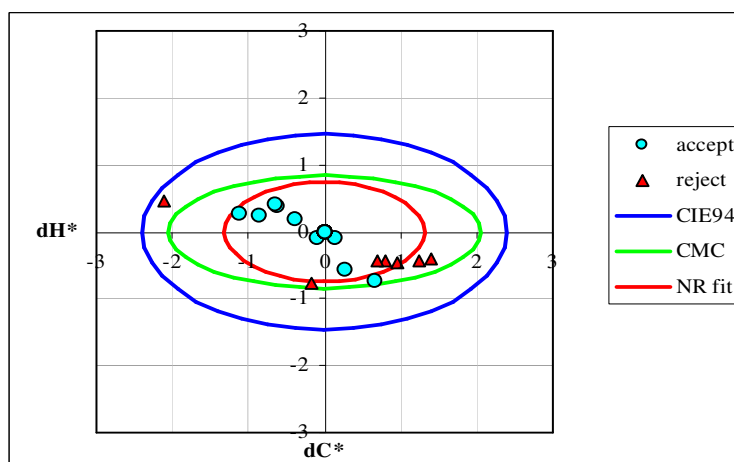
Graf 4: Toleranční elipsy pro béžové vzorky s osami dL^* a dC^*



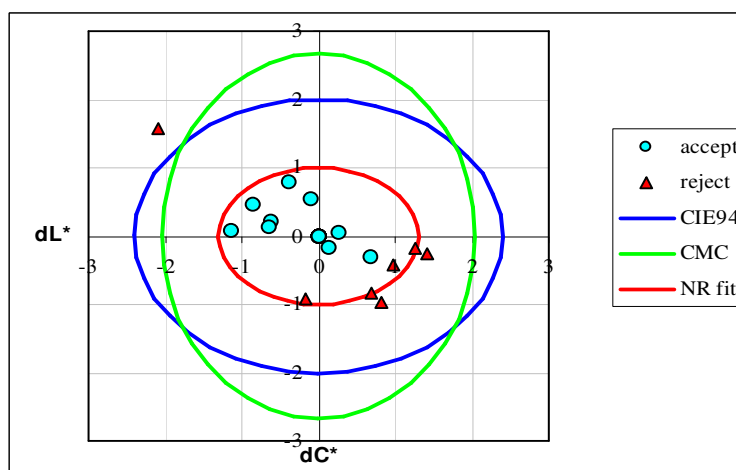
Graf 5: Toleranční elipsy pro béžové vzorky s osami dL^* a dH^*



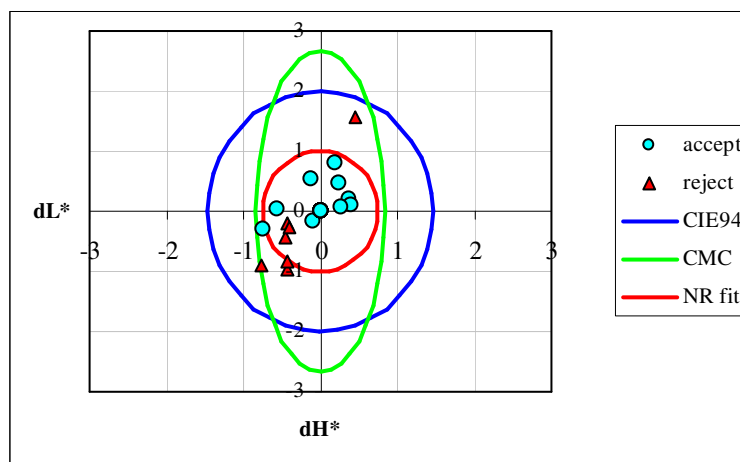
Graf 6: Toleranční elipsy pro béžové vzorky s osami $dL99$ a $dH99$



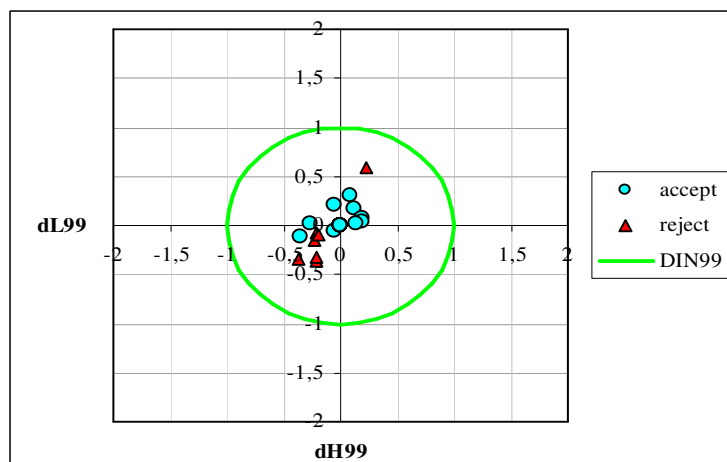
Graf 7: Toleranční elipsy pro oranžové vzorky s osami dH^* a dC^*



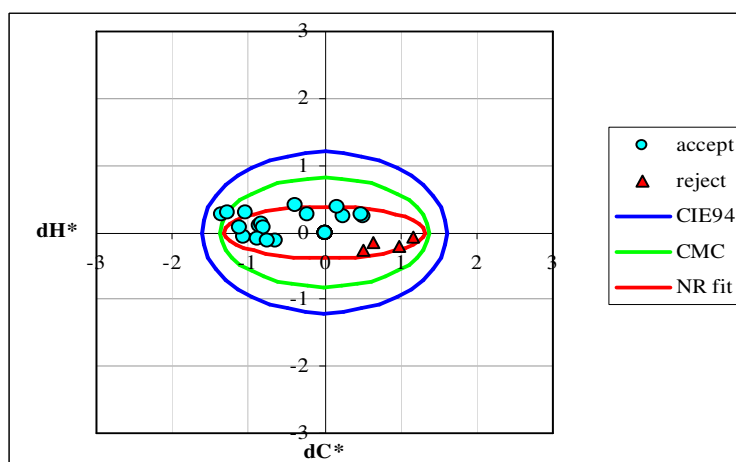
Graf 8: Toleranční elipsy pro oranžové vzorky s osami dL^* a dC^*



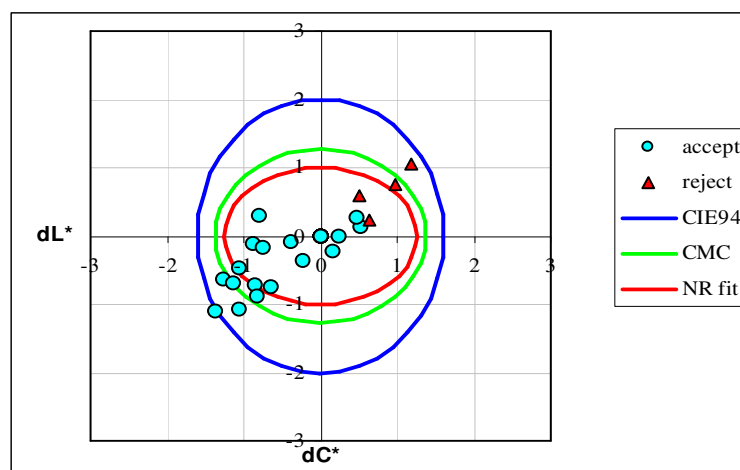
Graf 9: Toleranční elipsy pro oranžové vzorky s osami dL^* a dH^*



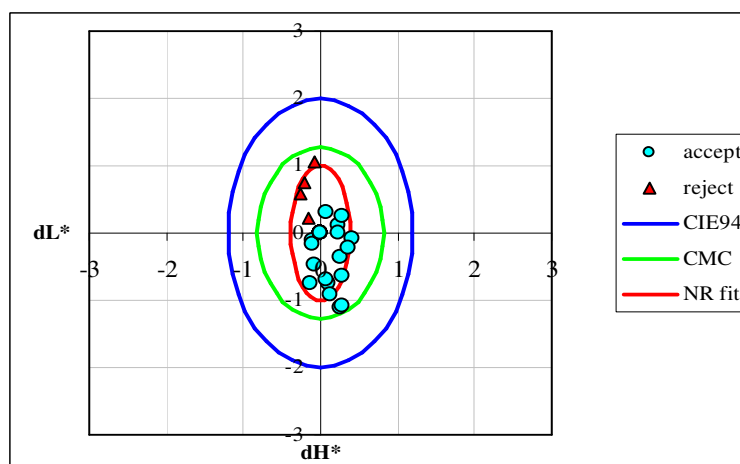
Graf 10: Toleranční elipsy pro oranžové vzorky s osami dL_{99} a dH_{99}



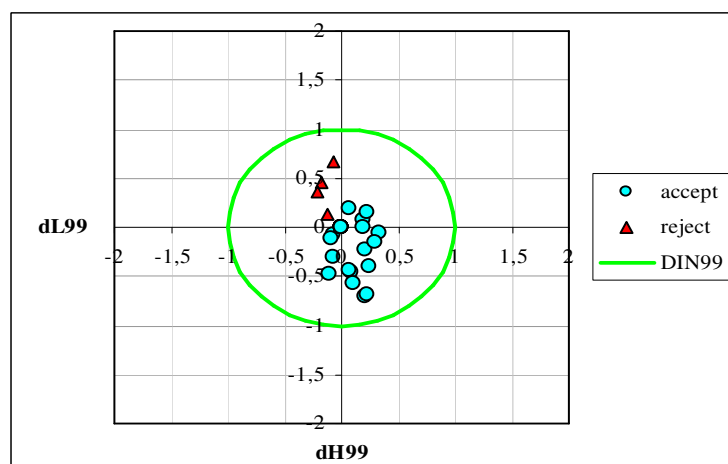
Graf 11: Toleranční elipsy pro modré vzorky s osami dH^* a dC^*



Graf 12: Toleranční elipsy pro modré vzorky s osami dL^* a dC^*



Graf 13: Toleranční elipsy pro modré vzorky s osami dL^* a dH^*



Graf 14: Toleranční elipsy pro modré vzorky s osami dL99 a dH99

Z uvedených grafů vyplývají následující poznatky:

1. CIE94 bere v úvahu větší toleranční rozmezí než-li CMC(2:1).
2. barevné odchylky se často vyskytují mimo rámec tolerančních elips. Příčina může být i v odlišnosti přístupových modelů rovnic CIE94 a CMC(2:1). CIE94 je lineární model a CMC(2:1) je naopak hyperbolický model.

3.6. Výsledky

Hodnoty vizuální barevné odchylky ΔV byly naměřeny se zahrnutím zrcadlové složky odrazu (SCI měřící geometrie). Pomocí SCI geometrie lze při měření posuzovaných vzorků eliminovat vliv textury. Vizuální barevná odchylka ΔV byla vypočtena podle rovnice:

$$\Delta V = -1,078 + 23,56 \cdot e^{(-GS/1,709)} \quad (33)$$

kde GS je stupeň šedé stupnice (vážený průměr z pěti měření respondentů) [25].

3.6.1. T-test

Obecně je test založen na skutečnosti, že výběrový průměr z normálního rozdělení, od něhož se odečte střední hodnota tohoto rozdělení a rozdíl se vydělí výběrovou směrodatnou odchylkou, má T rozdělení.

Skupina 1 vs. Skup. 2	SUP vs. AVG	SUP vs. LOW1	SUP vs. LOW2
Průměr skupiny 1	1.295495	1.295495	1.295495
Průměr skupiny 2	1.546109	0.981590	1.997283
Hodnota t	-1.51950	2.61173	-2.34230
sv	142	142	142
p	0.130861	0.009977	0.020555
Poč. plat. skup. 1	72	72	72
Poč. plat. skup. 2	72	72	72
Sm.odch. skupiny 1	0.889627	0.889627	0.889627
Sm.odch. skupiny 2	1.080350	0.498660	2.381589
F-poměr rozptyly	1.474733	3.182786	7.166680
p rozptyly	0.103979	0.000002	0.000000

Tab. 3: T- test pro nezávislé vzorky

Tabulka 3 zobrazuje hodnoty všech skupin respondentů ku skupině s vysokou rozlišovací schopností. Proměnné zde byly brány jako nezávislé vzorky.

3.6.2. Spearmanovy korelační koeficienty

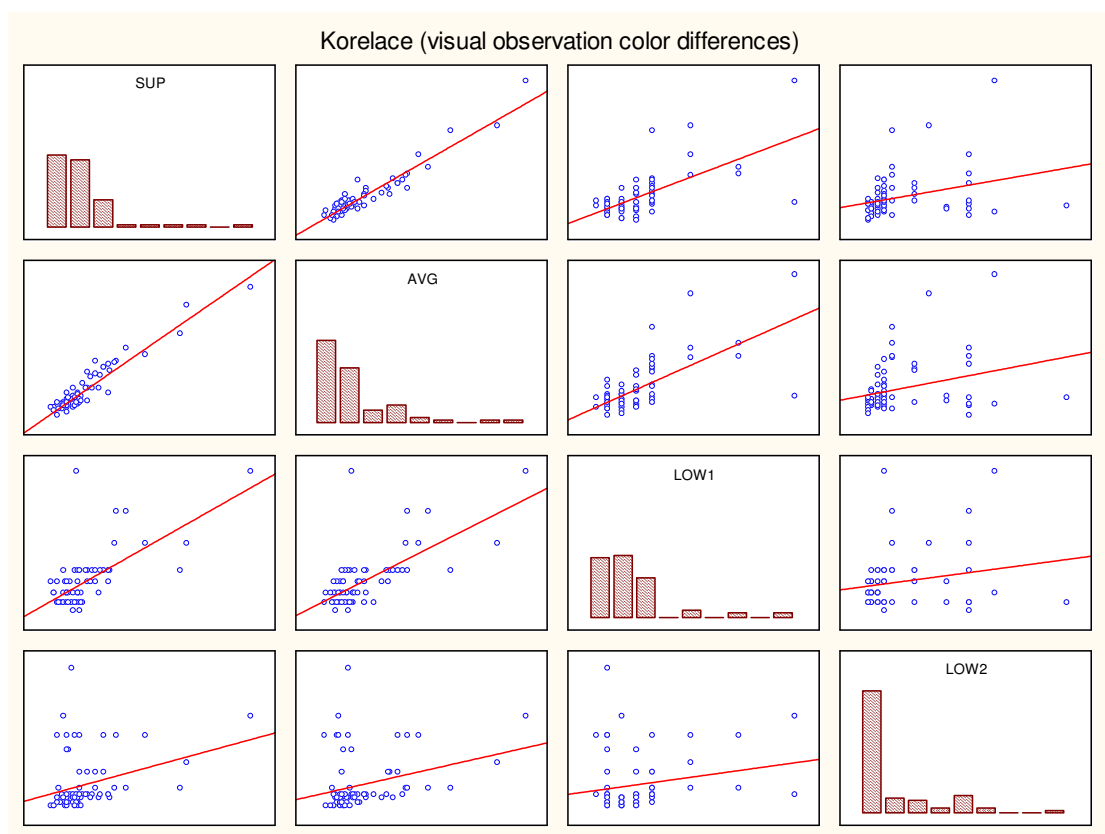
Skupina 1 vs. Skup. 2	SUPERIOR	AVERAGE	LOW 1	LOW 2
SUPERIOR	1.000000	0.851308	0.586851	0.392924
AVERAGE	0.851308	1.000000	0.615199	0.387365
LOW 1	0.586851	0.615199	1.000000	0.218106
LOW 2	0.392924	0.387365	0.218106	1.000000

Tab. 4: Spearmanovy korelační koeficienty

Tabulka 4 ukazuje vypočítané korelační koeficienty pro jednotlivé skupiny respondentů. Koeficienty ukazují jak moc málo jsou různé odchylky.

Číslo 1 říká, že je stoprocentní shoda v ose x a v ose y. Nejlepší shody dosáhlo dle předpokladu srovnání skupiny SUPERIOR a AVERAGE s výsledkem 0,851308. Nejnižší hodnotou je číslo 0.218106, které je spočítáno z hodnot skupin LOW 1 a LOW 2 (obě s nízkou rozlišovací schopností) a shoda je zde nejnižší.

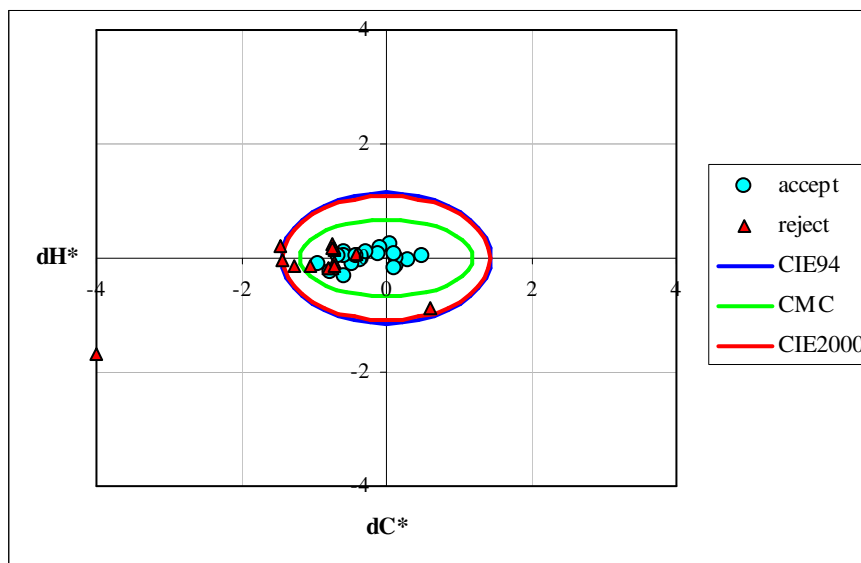
Čím více se číslo blíží k hodnotě -1, tím je rozdíl mezi odchylkami větší.



Tab. 5: Korelace dat vizuálního hodnocení barevných odchylek mezi jednotlivými skupinami pozorovatelů

Korelační index je obecnou mírou závislosti kolem libovolné analytické funkce, k jejímuž výpočtu jsme použili metodu nejmenších čtverců. Pokud je regresní čarou přímka, pak se korelační index nazývá korelačním koeficientem.

Na uvedených korelačních grafech je znázorněna vzájemná korelace mezi jednotlivými skupinami pozorovatelů. Z grafů plyne, že nejvyšší souvztažnost je mezi skupinami hodnotitelů SUPERIOR a AVERAGE, kde hodnoty vykazují lineární trend (na rozdíl od porovnání pozorovatelů Low 1 a Low 2). Koncentrace dat je v tomto případě v úzkém rozmezí, ale data nejsou rozložena rovnoměrně po celé délce přímky.



Graf 15: Toleranční elipsy pro modré vzorky s osami dH^* a dC^*

Na grafu 15 jsou zobrazeny toleranční elipsy pro rovnice CIE94, CMC a CIE 2000 v barevném prostoru CIELAB. Z grafu je patrné, že nejmenší toleranční meze má rovnice CMC. CIE94 bere v úvahu téměř shodné toleranční rozmezí jako CIE 2000. Akceptovatelné vzorky jsou opět zakresleny jako modré kolečko a neakceptovatelné jako červený trojúhelník.

3.6.3. Analýza rovnic pomocí Pf/3 faktoru

Během doby byla pro hodnocení kvality diferenčních rovnic vyvinuta řada kritérií. Korelační koeficient r je mírou statistické vazby mezi individuálními vizuálními posudky a příslušnou rovnicí. To platí za předpokladu, že regresní čára je přímka a datový soubor má normální rozdělení. Výběrový korelační koeficient r nabývá hodnot od -1 do 1 podle stupně lineární závislosti. Krajních hodnot nabývá v případě, že vztah mezi veličinami má funkční charakter a je tedy vzájemně jednoznačný.

Bylo zjištěno, že r ne vždy dostatečně charakterizuje kvalitu příslušné diferenční rovnice a proto byla navržena postupně další řada kritérií: např. „performance“ faktor Pf/3 udává výkon testované rovnice vzhledem k vizuálnímu testu tzn. uvádí hrubou chybu v procentech při určení ΔV_i [25]:

$$PF/3 = \frac{100[(\gamma - 1) + V_{AB} + CV/100]}{3} \quad (34)$$

$$\gamma = \log_{10}(\Delta E_i / \Delta V_i) \quad (35a)$$

$$V_{AB} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(\Delta E_i - F \Delta \Delta_i)^2}{\Delta E_i F \Delta \Delta_i}} \quad (35b)$$

kde

$$F = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \Delta E_i / \Delta \Delta_i}{\sum_{i=1}^N \Delta V_i / \Delta \Delta_i}}$$

$$CV = 100 \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(\Delta E_i - f \Delta \Delta_i)^2}{(\overline{\Delta E_i})^2}} \quad (35c)$$

kde platí

$$f = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \Delta E_i \Delta V_i}{\sum_{i=1}^N \Delta V_i^2}}$$

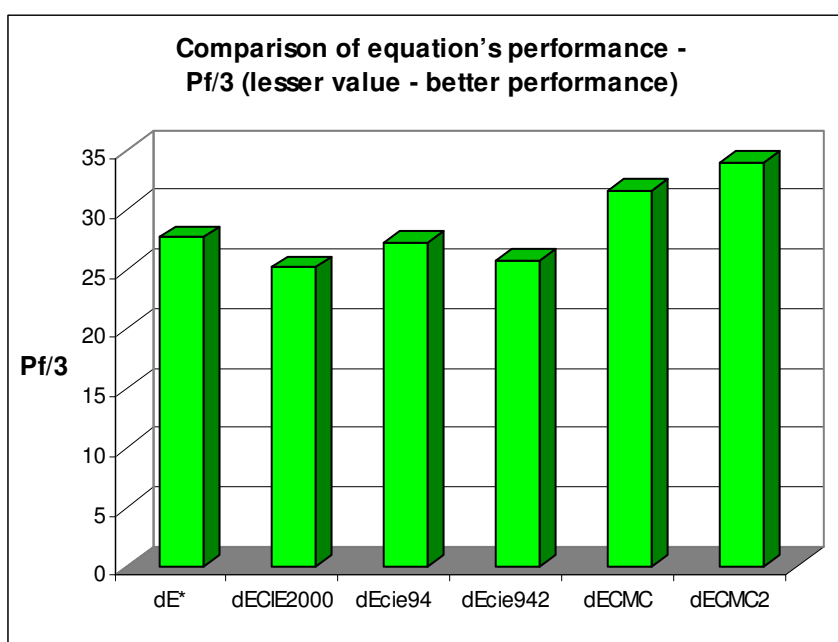
pokud ΔE_i a $\Delta V_i = 0$, CV a $V_{AB} = 0$, $\gamma = 1$ pak $PF/3 = 0$.

ΔV je numerická difference, CV je variační koeficient testované rovnice vzhledem k vizuálnímu testu, V_{AB} je variabilita testované rovnice, γ je parametr vypočtený podle rovnice 35a. V_{AB} , CV hodnoty vyjadřují druhou odmocninu ΔE_i s ohledem na ΔV_i hodnoty.

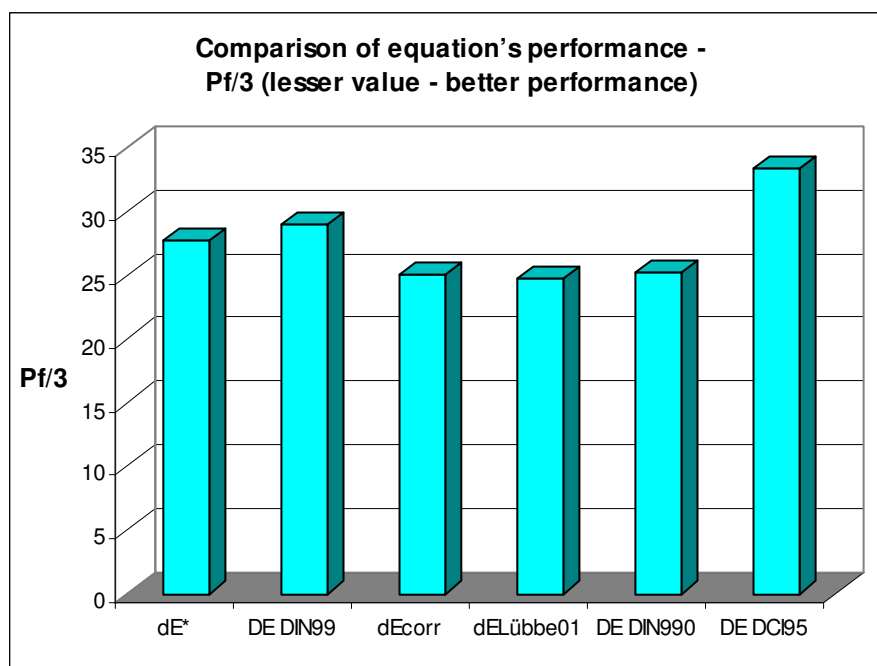
Vyšší hodnota $PF/3$ značí horší soulad mezi vizuální a naměřenou hodnotou a znamená nižší predikční schopnost testované rovnice.

PF/3 – „performance“ faktor, navrhl Guan a Luo, vycházel z doporučení Luo a Rigg. Hlavním důvodem navržení PF/3 indexu byly časté rozdíly v měření, které vedly k různým závěrům (CV versus V_{AB}). PF/3 nemůže být použit k určení důležitosti barevné difference mezi dvěma rovnicemi. Nedávná analýza statistické důležitosti byla vyjádřena poměrem $F = V_A + V_B$, kde indexy A, B značí dvě rozdílné rovnice pro výpočet barevných diferencí [26].

3.6.4. Analýza rovnic pomocí korelačního koeficientu



Graf 16: Porovnání rovnic pomocí Pf/3 faktoru (menší hodnota – vyšší schopnost rovnice)



Graf 17: Porovnání rovnic pomocí Pf/3 faktoru (menší hodnota – vyšší schopnost rovnice)

V grafech 16 a 17 jsou názorně zobrazeny predikční schopnosti jednotlivých testovaných rovnic. Pro lepší orientaci jsou jednotlivé rovnice rozděleny do dvou grafů. Pro srovnání je v obou grafech uvedena hodnota rovnice CIELAB (sloupec dE*). Graf 15 znázorňuje rovnice CIELAB, CIE 2000 a CMC. Graf 16 zobrazuje rovnice CIELAB, DIN 99, DIN 990 a DCI 95.

V obou grafech platí, že čím je menší hodnota (tedy nižší sloupec) testované rovnice, tím jsou její predikční schopnosti pro určování malých barevných rozdílů vyšší. Překvapivě nejlépe dopadla rovnice CIE 2000. Oproti jiným testům, které byly v laboratoři KMT provedeny, měla rovnice v tomto experimentu velmi dobré výsledky. Pořadí dalších rovnic (od lepších k horším) bylo následující: CIE 1994 2 a DIN990 měly velmi podobné výsledky. Dále také výsledky CIE 1994, CIELAB (sloupec dE*) a DIN99 se od sebe příliš nelišily. Následovaly rovnice CMC a DCI 95. Zajímavé je, že u všech barevných center měla nejlepší výsledky rovnice DIN990. Velkým překvapením pak byly nejhorší výsledky rovnice CMC 2, která při předchozím testování dopadala lépe než CIE 2000. Zde pravděpodobně hraje určitou roli měrná světlost.

Datové soubory, ze kterých byly čerpány hodnoty pro tyto dva grafy, byly natolik rozsáhlé, že byly dány v elektronické podobě pouze na CD přiložené k této diplomové práci.

4. ZÁVĚR

V první části diplomové práce byl formou rešerše zpracován přehled dosavadních poznatků zaměřujících se na výpočty barevných rozdílů. V první kapitole byla popsána kolorimetrická soustava CIE XYZ, která stála u zrodu moderního měření barevnosti a vzhledu. Jejím základem je systém RGB.

Následující kapitoly rešeršní části postupně popisují vybrané rovnice pro výpočet barevných rozdílů: CIELAB se používá pro měření rozdílů ve vzhledu barev. Je jednou z nejjednodušších rovnic, její hlavní výhodou je snadnější výpočet barevné difference. Rovnice CMC (1:c) využívá k vyjádření tolerancí konstrukci rovnoosých elipsoidů (místo „koulí), které je možné podle potřeby přizpůsobit různým potřebám koloristické praxe. Rovnice CIE 1994 je podobně jako CMC (1:c) založená na principu rotačních elipsoidů. Vychází ale z lineárního modelu. Její přínos spočívá především v jednoduchosti. Z hlediska průmyslových posudků barevných diferencí nepřináší výrazné zlepšení. DIN 99 je založená na transformaci kolorimetrické soustavy CIELAB. DCI 95 byla vytvořena ve spolupráci s textilní firmou s využitím poznatků z praxe. Poslední zmiňovanou rovnicí byla CIE 2000, která vznikla na základě diskuzí o vlivu natočení elipsoidu na predikční schopnosti rovnic pro výpočty barevných diferencí.

V rešeršní části bylo dále popsáno subjektivní a objektivní hodnocení barevnosti. Nastíněna byla metodika měření barevnosti v kolorimetrické skříni a na spektrofotometru, včetně uvedení výhod a nevýhod obou způsobů. Správné měření vzorků je nezbytné pro další zpracování naměřených hodnot.

Experimentální část se věnovala hodnocení barevných rozdílů na souboru tří barevných center (béžová, oranžová a modrá). Nejprve byly všechny připravené vzorky čtyřikrát proměřeny s 90-ti stupňovou rotací vzorků na spektrofotometru Spektraflash 300. Následovně byly vzorky vizuálně ohodnoceny souborem jedenadvaceti pozorovatelů.

Před posuzováním vzorků absolvoval každý hodnotitel tzv. Munsellův test, který odhalí špatné vidění respondenta a určí, v jaké barevné oblasti je vidění defektní. Na základě výsledků tohoto testu byl soubor pozorovatelů rozdělen do tří skupin (vynikající rozlišování, průměrné rozlišování a nízké rozlišování). Každý pozorovatel

hodnotil při vizuálních testech barevnou odchylku mezi standardem a vzorkem (tzv. párové srovnávání) v porovnání s šedou stupnicí určenou pro hodnocení rozdílů odstínů. Hodnoty získané vizuálním testováním respondentů byly vyhodnoceny s ohledem na vizuální odchylku (validitu) a výsledky byly poté zpracovány do dvourozměrných grafů v programu Excel.

Cílem této práce bylo porovnat predikční schopnosti rovnic CIELAB, CMC (1:c), CIE1994 a DIN99 pro výpočty barevných rozdílů. Predikce rovnic je vyjádřena korelačním koeficientem a výkonnostním faktorem ve vztahu k vizuálním barevným diferencím. Při porovnání těchto schopností jednotlivých rovnic překvapivě (vzhledem k předchozímu testování v laboratoři KMT) nejlepších výsledků dosáhla rovnice CIE 2000. Zajímavé je, že u všech barevných center měla nejlepší výsledky rovnice DIN990. Naopak velkým překvapením pak byly nejhorší výsledky, v textilní praxi doposud používané, rovnice CMC 2, která při předchozím testování měla lepší výsledek než CIE 2000. Rovnici CIE 2000 je tedy možné dle těchto výsledků doporučit jako standardní rovnici pro výpočet malých barevných rozdílů a pro použití v textilní praxi. Lze konstatovat, že cíl práce byl splněn.

Přestože výzkum barevných center probíhá již několik let, všechna centra nebyla dosud zmapována. Z práce vyplývá, že nejvhodnější rovnicí pro hodnocení malých barevných rozdílů je CIE 2000, i když předchozí výzkumy toto nepotvrzují. Vzhledem k výsledkům této práce, by bylo vhodné provést vizuální posudky znovu na stejném souboru vzorků širším panelem respondentů. Bylo by tak možné zajistit reprodukovatelnost dat a zároveň potvrdit zde uvedený výsledek.

Seznam použité literatury a dalších zdrojů

- [1] CIE, International Commission on Illumination, Proceedings of the Eight Session, Cambridge, England, Bureau Central de la CIE, Paris 1931
- [2] Brabec, S.: Než začneme skenovat, 2001, dostupné z: <http://www.root.cz/clanky/>
- [3] Tezaur, R.: Měření a míchání barev, 2003, dostupné z:
<http://www.paladix.cz/clanky/>
- [4] Vik, M.: Měření barevnosti a vzhledu – barevné odchylky, Technická univerzita v Liberci 2002
- [5] Giorgianni E. J., Madden T. E.: Digital Color Management, ed. Addison.Wesley, 1997
- [6] Judd, D.B., Wyszecki, G.: Color in business, science, and industry, John Wiley & Sons New York 1975, third edition
- [7] Pihan, R.: Základy kolorimetrie, 2003, dostupné z:
<http://www.fotoroman.cz/techniques.htm>
- [8] Zmeškal O., Čeppan M., Dzik P.: Barevné prostory a správa barev, 2002
- [9] Černý J., Koudelka M.: Praktické aspekty koloristiky, 2000
- [10] Hunter Associates Laboratory: Color Theory - CMC, Vol. 8, No. 13, 10/1996.
- [11] Vik, M.: Základy měření barevnosti I., Technická univerzita v Liberci 1995
- [12] <http://www.upson.co.kr/ver1/chinese/theory-2.htm>
- [13] <http://www.brucelindbloom.com/>
- [14] Luo, M., R., Rigg, B.: J. Soc. D. Col. 103(1987), 2, 86-94
- [15] Luo, M., R., Rigg, B.: J. Soc. D. Col. 103(1987), 4, 161-167
- [16] Alman, D. H.: Color Res. Appl. 18(1993), 2, 137-139
- [17] <http://www.uniware.cz/clanky/deltae94.htm>
- [18] Luo, M. R., Cui, G., Rigg, B.: Color Res Appl. 26(2001), 6, 340-350
- [19] Berns, R. S.: Derivation of a hue-angle dependent, hue-difference weighting function for CIEDE2000, AIC Color 01, Rochester 24-29. 06. 2001, USA

- [20] Marguier, J., Süssstrunk, S.: Color matching functions for a perceptually uniform RGB space. CIE konference, Ottawa, Kanada, 03/2006
- [21] Imai, F. H., Rosen, M. R. a Berns, R. S.: Comparative Study of Metrics for Spectral Match Quality. 1. konference CGIV 2002, USA. Dostupné z: http://www.art-si.org/PDFs/Metric/Imai_CGIV2000.pdf.
- [21] Vyhlásová, J.: Průmyslové posudky barevných diferencí, Diplomová práce, TU Liberec, 1999
- [23] Příspěvatelé Wikipedie, Spektrofotometr, Wikipedie: Otevřená encyklopedie, 2008
- [24] Investigative Ophthalmology and Visual Science, 1993, Vol. 34, No. 3
- [25] Vik, M.: Příspěvek k problematice výpočtu malých bar. odchylek. Doktorská disertační práce, TU Liberec, 2004.
- [26] Chou, W., Lin, H., Luo, M. R. a kolektiv: Performance of lightness difference formulae; Color. Technol., 117 (2001) 19-29.

PŘÍLOHY

SEZNAM PŘÍLOH

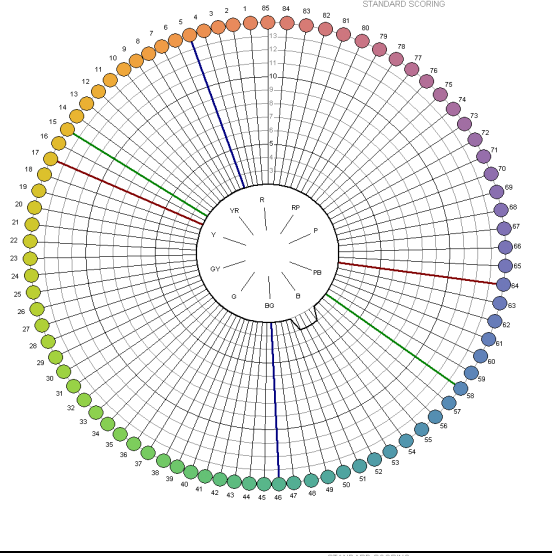
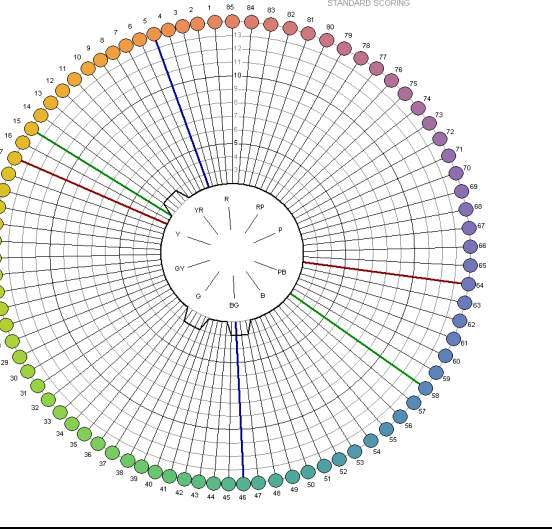
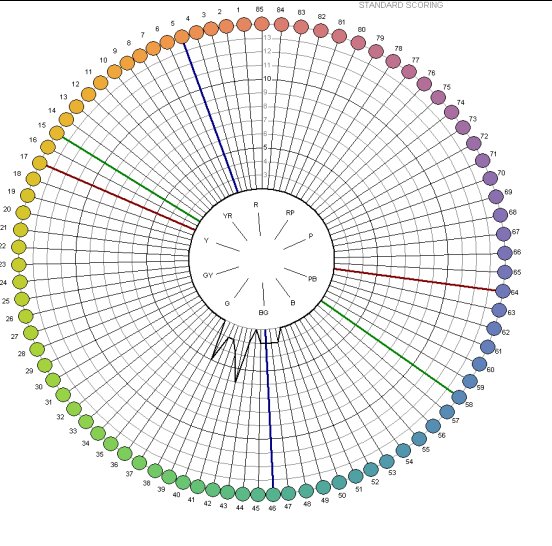
SEZNAM PŘÍLOH

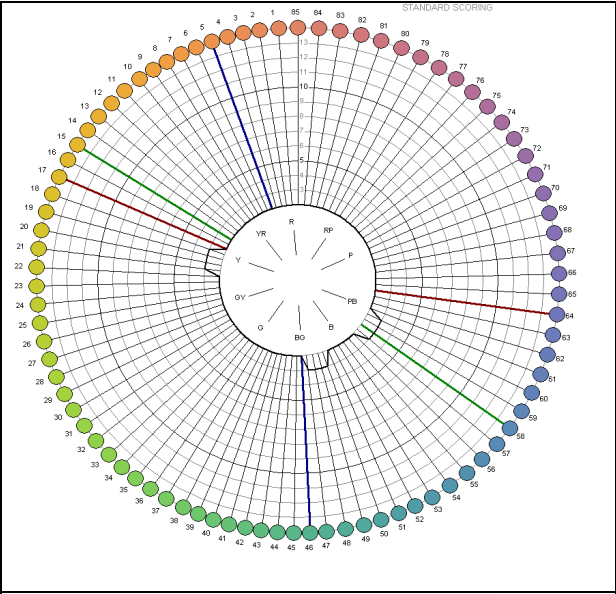
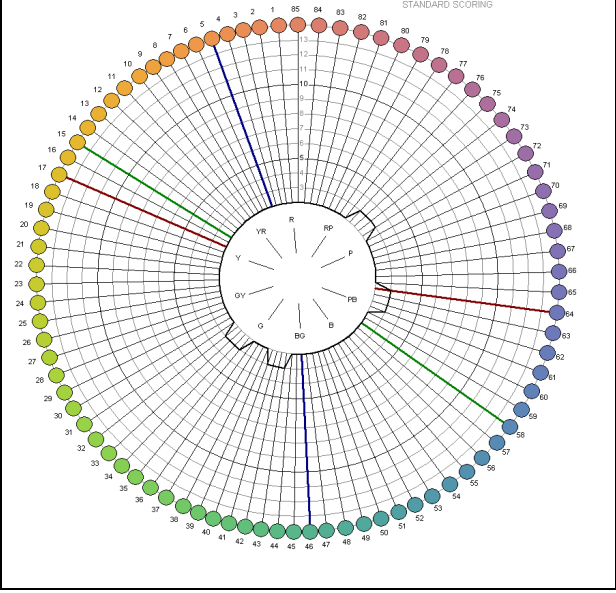
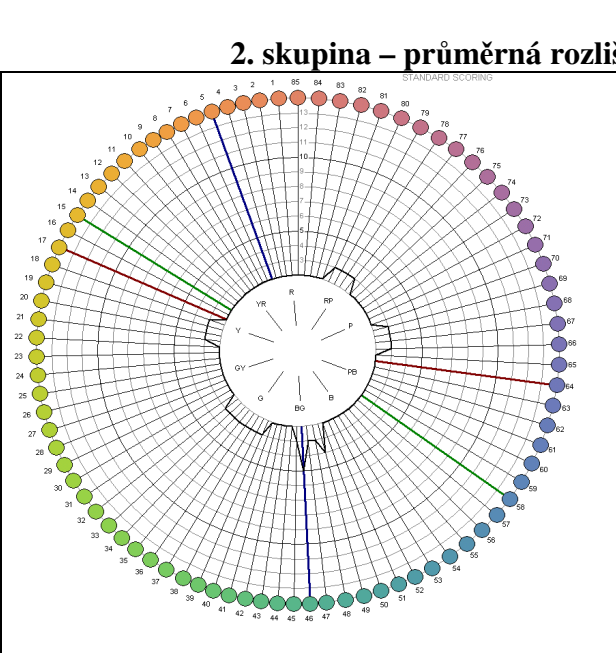
Příloha 1	49
Příloha 2	57
Příloha 3	59

Příloha 1

Polární diagramy Farnsworth – Munsell 100 – Hue testu.

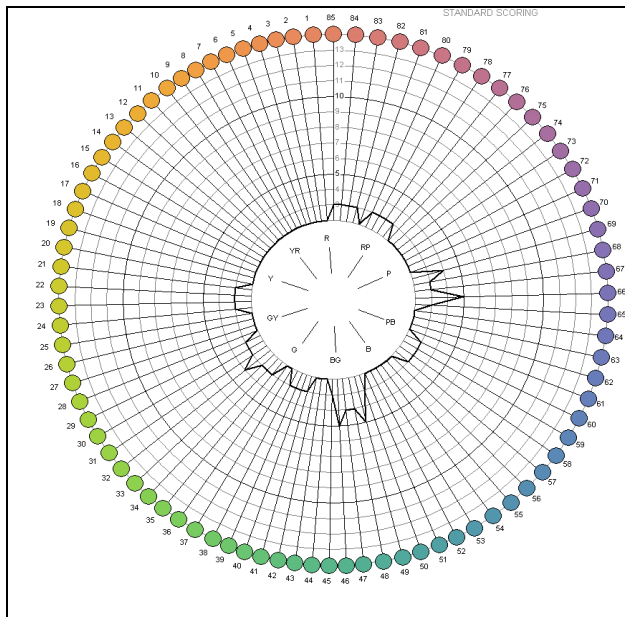
1. skupina – nejlepší rozlišovací schopnost barev

	<p>ANALYSIS Subject - 1 Reference - S005</p> <p>Total error score (TES) = 4 Square root (TES) = 2.0 Classification = Superior discrimination Diagnosis - Normal</p>
	<p>ANALYSIS Subject - 2 Reference - D004</p> <p>Total error score (TES) = 12 Square root (TES) = 3.46 Classification = Superior discrimination Suggested Diagnosis - Normal</p>
	<p>ANALYSIS Subject - 3 Reference - K006</p> <p>Total error score (TES) = 16 Square root (TES) = 4.0 Classification = Superior discrimination Suggested Diagnosis - Normal</p>

	<p>ANALYSIS Subject - 4 Reference - D009</p> <p>Total error score (TES) = 12 Square root (TES) = 3.46 Classification = Superior discrimination Suggested Diagnosis - Normal</p>
	<p>ANALYSIS Subject - 5 Reference - S014</p> <p>Total error score (TES) = 16 Square root (TES) = 4.0 Classification = Superior discrimination Suggested Diagnosis - Normal</p>
<p>2. skupina – průměrná rozlišovací schopnost barev</p> 	<p>ANALYSIS Subject - 6 Reference - S001</p> <p>Total error score (TES) = 28 Square root (TES) = 5.29 Classification = Average discrimination Suggested Diagnosis - Normal</p>

	<p>ANALYSIS Subject - 7 Reference - S002</p> <p>Total error score (TES) = 32 Square root (TES) = 5.66 Classification = Average discrimination Diagnosis - Normal</p>
	<p>ANALYSIS Subject - 8 Reference - S003</p> <p>Total error score (TES) = 56 Square root (TES) = 7.48 Classification = Average discrimination Suggested Diagnosis - Normal</p>
	<p>ANALYSIS Subject - 9 Reference - S001</p> <p>Total error score (TES) = 20 Square root (TES) = 4.47 Classification = Average discrimination Suggested Diagnosis - Normal</p>

	<p>ANALYSIS Subject - 10 Reference - D007</p> <p>Total error score (TES) = 28 Square root (TES) = 5.29 Classification = Average discrimination Suggested Diagnosis - Normal</p>
	<p>ANALYSIS Subject - 11 Reference - S008</p> <p>Total error score (TES) = 64 Square root (TES) = 8.0 Classification = Average discrimination Suggested Diagnosis - Normal</p>
	<p>ANALYSIS Subject - 12 Reference - S019</p> <p>Total error score (TES) = 84 Square root (TES) = 9.17 Classification = Average discrimination Suggested Diagnosis - Normal</p>



ANALYSIS

Subject - 13

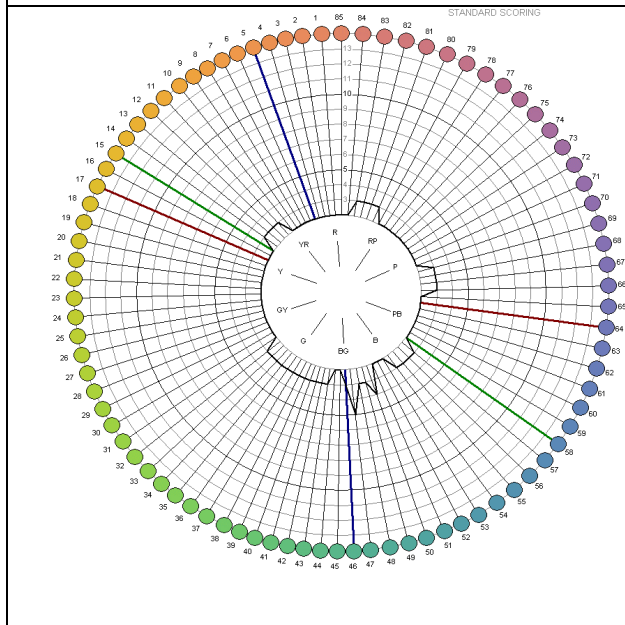
Reference - S020

Total error score (TES) = 48

Square root (TES) = 6.93

Classification = Average discrimination

Suggested Diagnosis - Normal



ANALYSIS

Subject - 14

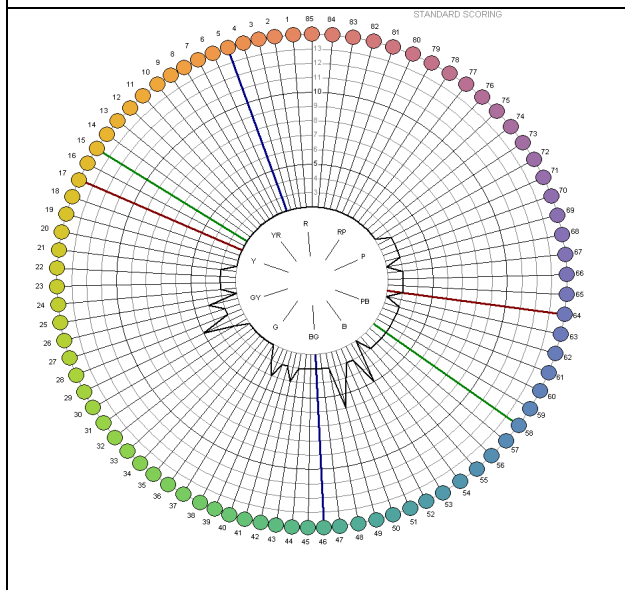
Reference - S011

Total error score (TES) = 36

Square root (TES) = 6.0

Classification = Average discrimination

Diagnosis - Normal



ANALYSIS

Subject - 15

Reference - S001

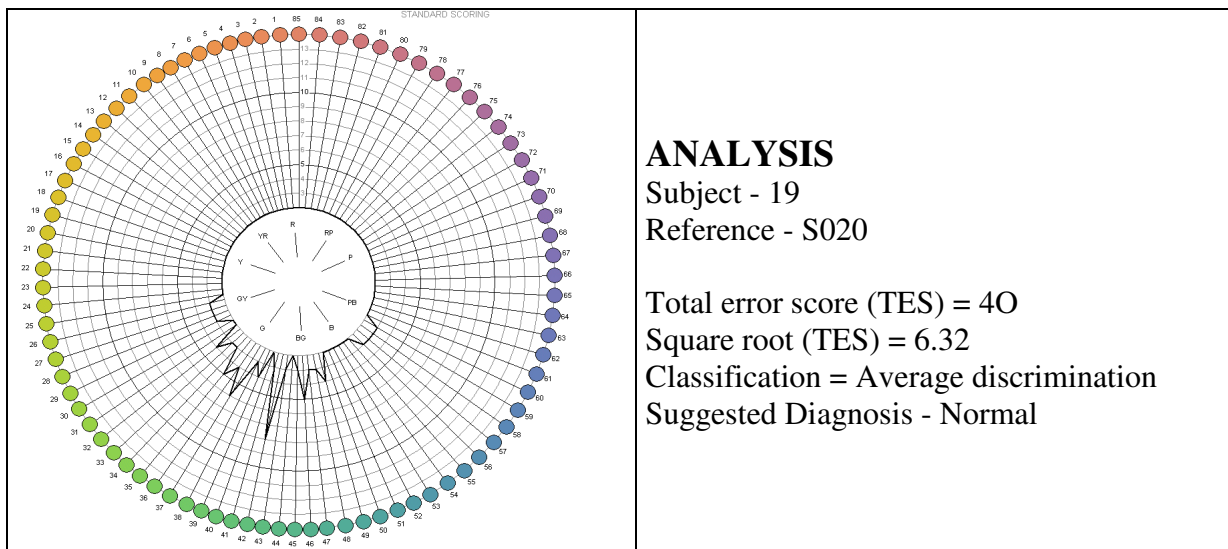
Total error score (TES) = 20

Square root (TES) = 4.47

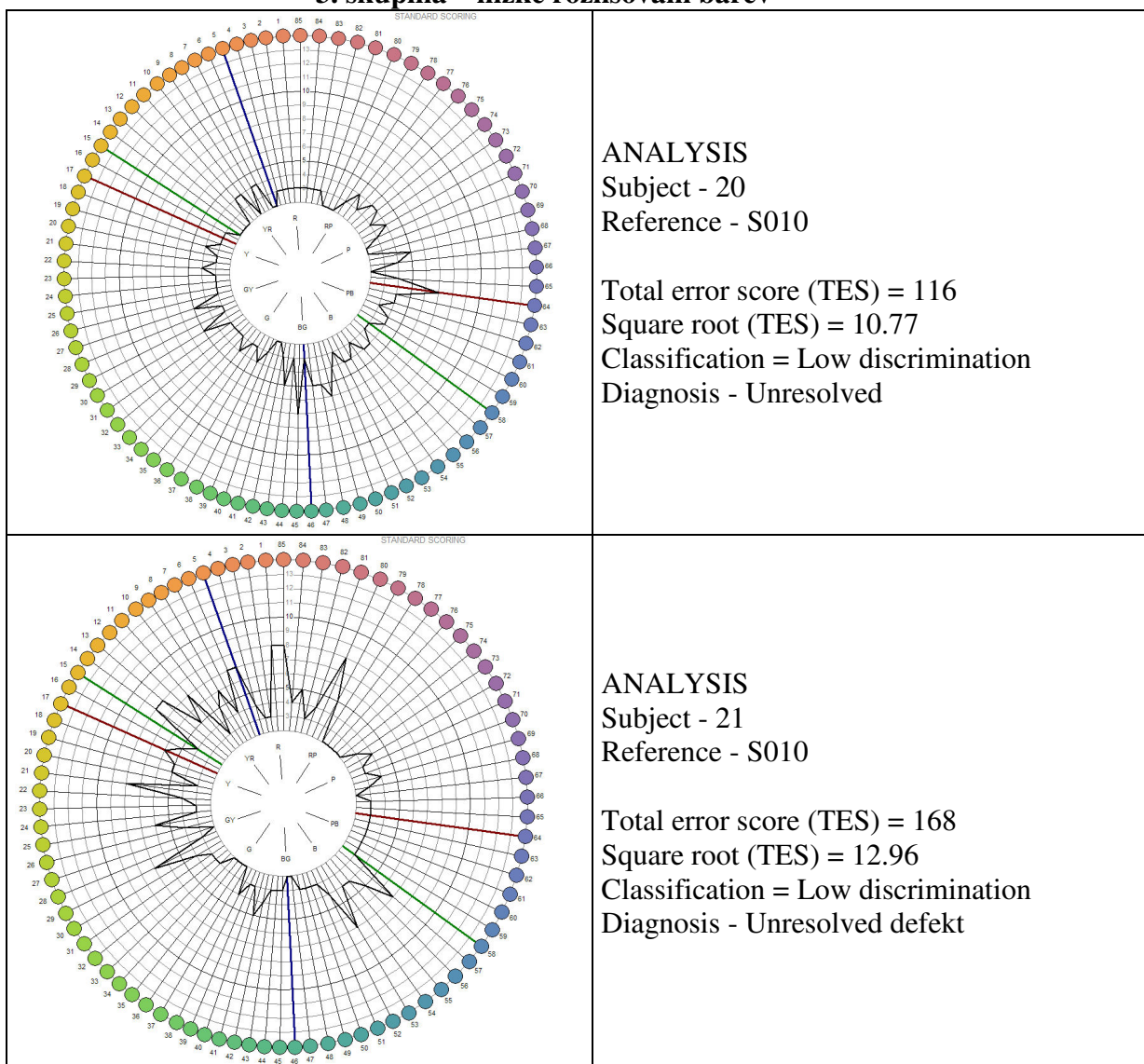
Classification = Average discrimination

Suggested Diagnosis - Normal

	<p>ANALYSIS Subject - 16 Reference - S013</p> <p>Total error score (TES) = 52 Square root (TES) = 7.21 Classification = Average discrimination Suggested Diagnosis - Normal</p>
	<p>ANALYSIS Subject - 17 Reference - S008</p> <p>Total error score (TES) = 84 Square root (TES) = 9.17 Classification = Average discrimination Suggested Diagnosis - Normal</p>
	<p>ANALYSIS Subject - 18 Reference - S015</p> <p>Total error score (TES) = 84 Square root (TES) = 9.17 Classification = Average discrimination Suggested Diagnosis - Normal</p>



3. skupina – nízké rozlišování barev



Příloha 2

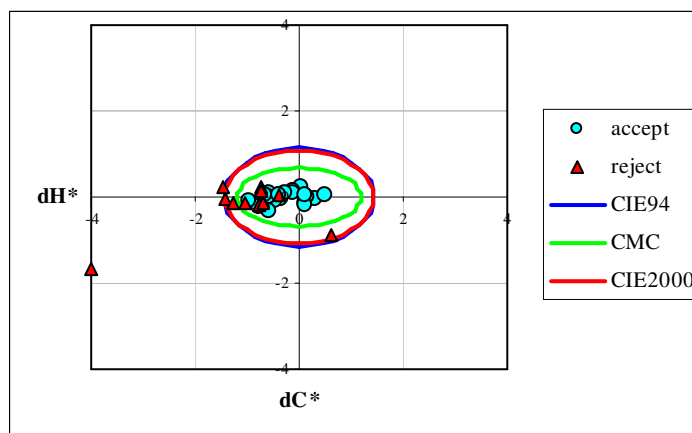
Hodnoty vizuálních a naměřených barevných odchylek daných diferenčních rovnic.

Název vzorku	Číslo vzorku	1.skupina	CIELAB	CIE942	CMC1	CMC2	CIE2000
		dV	dE*	dE	dE	dE	dE
Béžová barvastandard: 592	1	0,97947	0,23086	0,16777	0,25743	0,24588	0,23925
	2	1,67873	1,15487	0,70042	0,9394	0,77722	0,85011
	3	0,97947	0,32309	0,22042	0,27451	0,2668	0,23886
	4	0,82505	0,54299	0,32693	0,42441	0,34787	0,37467
	5	1,10345	0,67897	0,38414	0,5835	0,4338	0,52871
	6	1,52205	1,07018	0,65773	0,86253	0,72948	0,73871
	7	0,97947	0,87977	0,59685	0,77412	0,73862	0,64363
	8	2,02098	1,34113	0,75996	1,02493	0,74965	0,92066
	9	1,37428	0,69667	0,40032	0,53353	0,40126	0,47649
	10	1,96112	1,33691	0,75202	1,0112	0,72702	0,89131
	11	0,86253	0,54326	0,29796	0,4417	0,30803	0,40508
	12	2,14426	1,66126	1,09766	1,37889	1,29175	1,22485
	13	1,10345	0,77151	0,39484	0,5655	0,3154	0,51524
	14	1,32691	1,40535	0,79708	1,08423	0,7958	0,97873
	15	0,68222	0,69938	0,39061	0,52668	0,37258	0,46551
	16	1,10345	0,60583	0,38621	0,49586	0,44253	0,41986
	17	1,10345	1,06665	0,5543	0,78225	0,45677	0,70968
	18	1,47183	1,02088	0,64884	0,84014	0,74559	0,71273
	19	3,96847	2,2828	1,33525	1,75305	1,36426	1,54347
	20	1,10345	0,74038	0,37622	0,53385	0,28568	0,48447
	21	1,14642	0,48777	0,33985	0,41422	0,41405	0,33854
	22	1,84485	1,5422	0,92696	1,20999	0,98863	1,04909
	23	1,06132	1,29668	0,7108	0,97171	0,65854	0,87397
	24	1,73303	1,28226	0,74388	0,99684	0,76455	0,89623
	25	1,19023	1,34602	0,81751	1,05985	0,88122	0,9172
	26	0,75225	1,02195	0,58156	0,77463	0,57063	0,68774
	27	5,95256	4,84002	2,51818	3,65783	2,19527	3,28276
	28	1,62548	1,17009	0,68573	0,91357	0,71397	0,79348
	29	1,10345	0,9441	0,5115	0,70098	0,46039	0,62979
	30	4,16921	4,50275	3,20627	4,28097	4,2201	3,58095
	31	0,78829	0,65294	0,481	0,66178	0,6614	0,5452
	32	0,71689	0,50744	0,29217	0,43933	0,33564	0,40487
	33	0,45758	0,41575	0,21856	0,31004	0,18928	0,27812
	34	1,14642	0,9076	0,55591	0,71404	0,60221	0,6272
	35	1,96112	1,73867	1,06904	1,37773	1,16835	1,19168
modrá barva standard: 1016	1	1,14642	0,96976	0,56686	1,12502	0,74514	0,6468611
	2	1,01999	0,63676	0,38607	0,62961	0,48121	0,4171245
	3	0,71689	0,38264	0,2927	0,48392	0,4314	0,4372994
	4	1,06132	1,28111	0,7341	1,58644	0,99228	0,8618901
	5	2,47434	1,98734	1,14964	2,35607	1,52167	1,3034982
	6	0,64822	0,73141	0,41079	1,06652	0,61397	0,5657703
	7	0,90076	0,94894	0,56103	1,08664	0,73654	0,6351453
	8	2,20773	1,78021	1,09818	1,66704	1,35662	1,1194767
	9	1,84485	1,237	0,73771	1,46485	0,98899	0,8509583
	10	1,37428	0,98767	0,60731	1,01294	0,77461	0,6735685

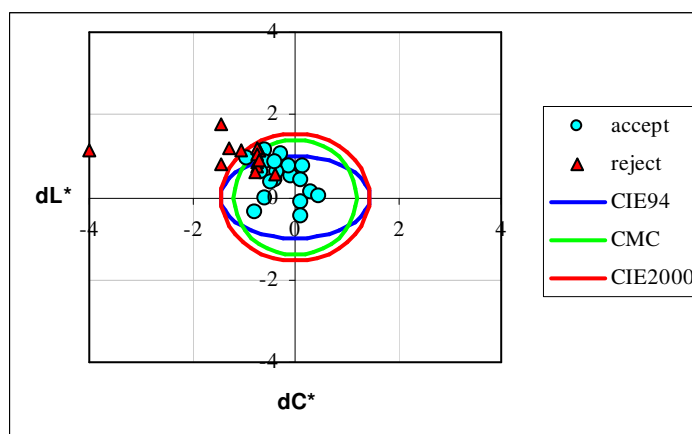
Oranžová barva standard: 213	11	1,01999	1,02138	0,62055	1,09004	0,79932	0,6874257
	12	0,61488	0,53404	0,31735	0,71863	0,45555	0,4210651
	13	0,82505	0,99496	0,516	1,48919	0,77862	0,6890453
	14	0,51867	0,69509	0,43724	0,65224	0,54742	0,4841644
	15	0,45758	0,51801	0,28642	0,68596	0,39899	0,3522133
	16	0,97947	0,70693	0,45581	0,55956	0,55323	0,4768602
	17	0,55011	0,42214	0,28477	0,36325	0,36299	0,3341619
	18	0,37031	0,44748	0,28732	0,53431	0,39753	0,3737196
	19	1,62548	1,06129	0,6628	0,96835	0,81839	0,6784473
	20	1,23491	0,52199	0,36468	0,48099	0,48094	0,4537755
	21	1,37428	0,77318	0,48701	0,60798	0,57965	0,4999286
	1	1,01999	1,47156	0,70177	0,98522	0,87448	0,81652
	2	0,78829	0,9344	0,43396	0,59078	0,51354	0,50951
	3	0,82505	0,74797	0,39941	0,62763	0,46117	0,53837
	4	1,14642	1,10271	0,64432	1,0642	0,92007	0,81932
	5	1,01999	1,6393	0,72982	0,9278	0,92564	0,74954
	6	0,71689	0,8931	0,45324	0,68921	0,38666	0,64378
	7	0,93973	1,33894	0,7072	1,08412	1,08275	0,77262
	8	0,55011	0,70257	0,32944	0,45507	0,37652	0,39573
	9	0,86253	1,09536	0,57052	0,86664	0,84272	0,63926
	10	0,82505	0,85027	0,44212	0,68084	0,49626	0,59179
	11	1,19023	1,45014	0,67825	0,92606	0,88879	0,73794
	12	0,82505	0,74004	0,36066	0,52242	0,3971	0,46138
	13	0,58218	0,65708	0,32972	0,49554	0,29489	0,4605
	14	2,99401	2,73972	1,31867	1,8955	1,23557	1,75162
	15	1,06132	0,96335	0,51983	0,82104	0,6402	0,68839
	16	1,01999	1,44142	0,6498	0,84288	0,82729	0,68209

Příloha 3

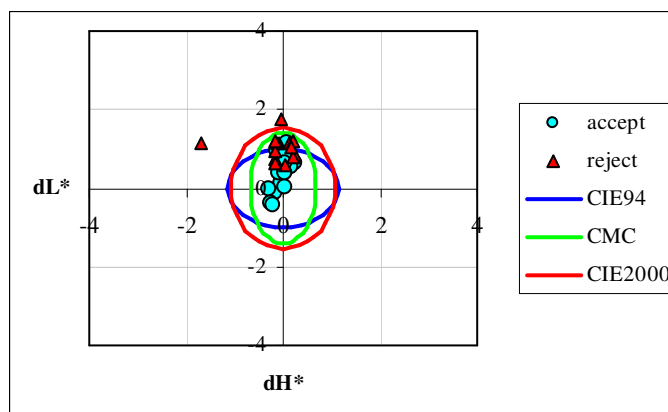
Projekce dat okolo barevných center.



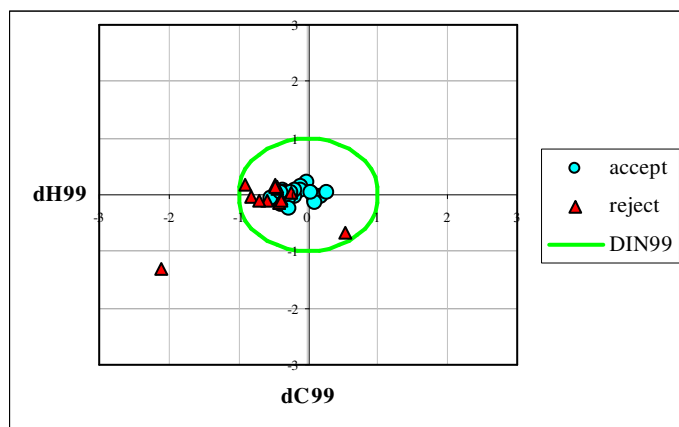
Graf: Projekce běžové na chromatické ploše prostoru CIELAB



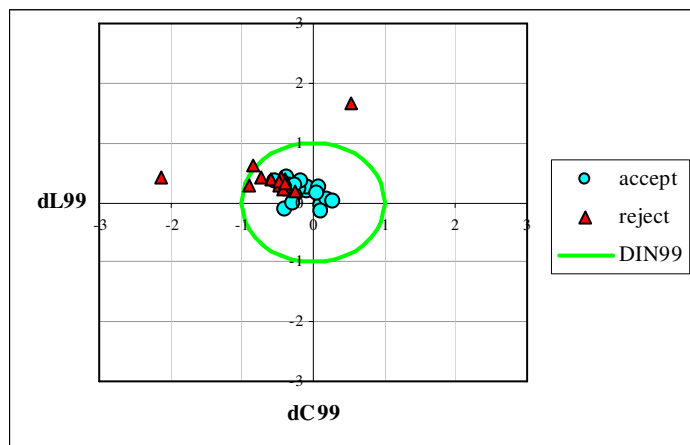
Graf: Projekce běžová na chromatické ploše prostoru CIELAB



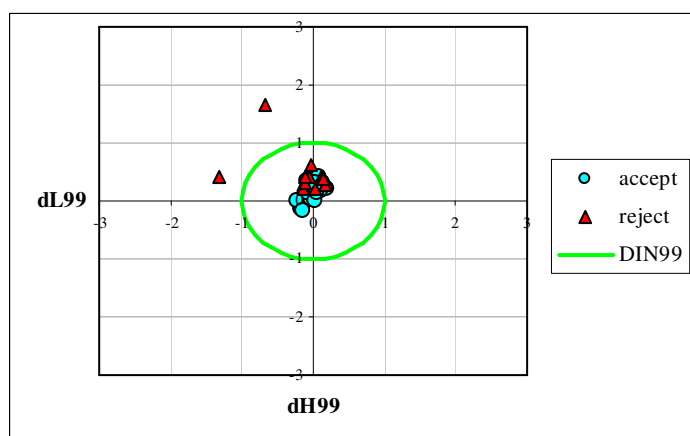
Graf: Projekce běžové na chromatické ploše prostoru CIELAB



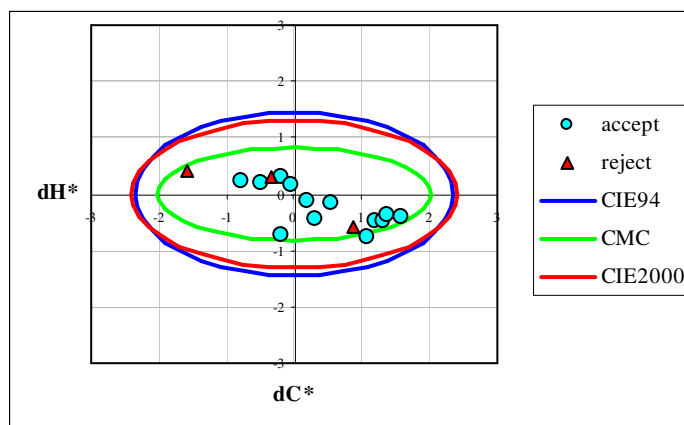
Graf : Toleranční elipsy pro běžové vzorky s osami dH99 a dC99



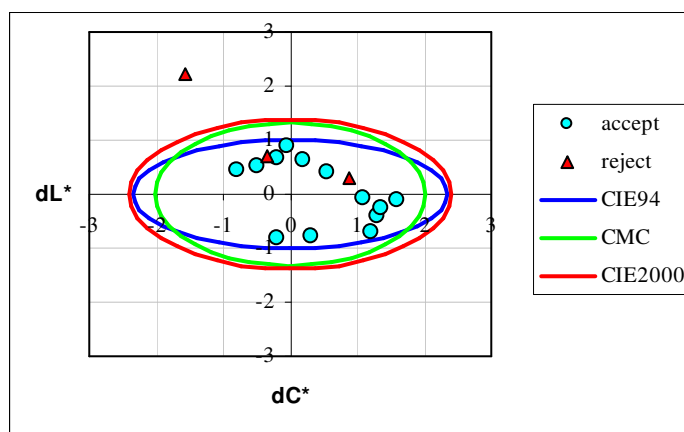
Graf : Toleranční elipsy pro běžové vzorky s osami dL99 a dC99



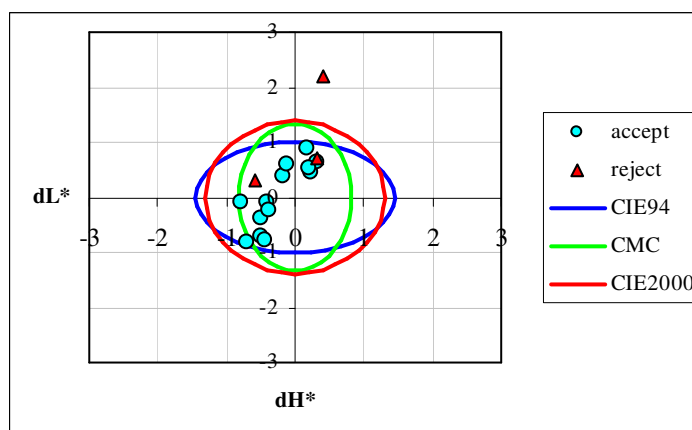
Graf : Toleranční elipsy pro běžové vzorky s osami dL99 a dH99



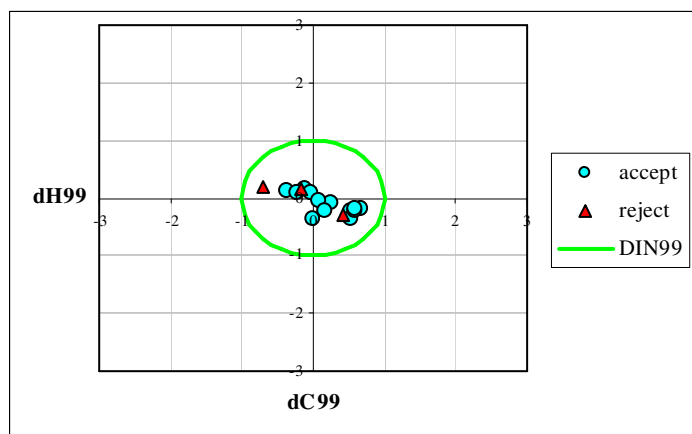
Graf: Projekce oranžové na chromatické ploše prostoru CIELAB



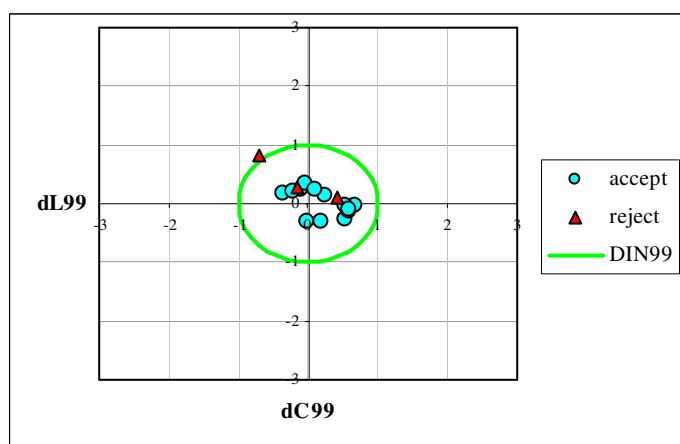
Graf: Projekce oranžové na ploše prostoru CIELAB



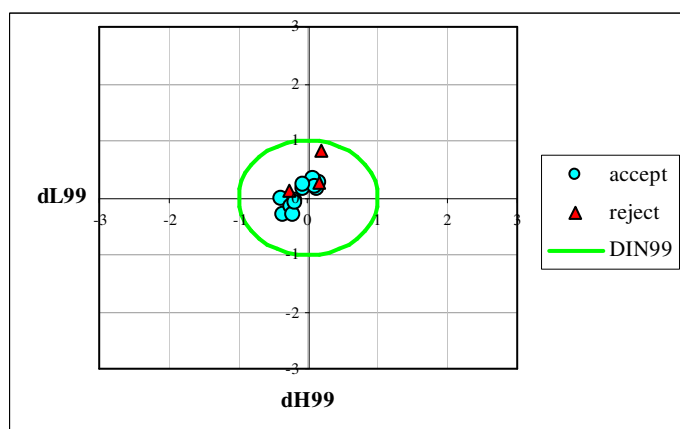
Graf: Projekce oranžové na ploše prostoru CIELAB



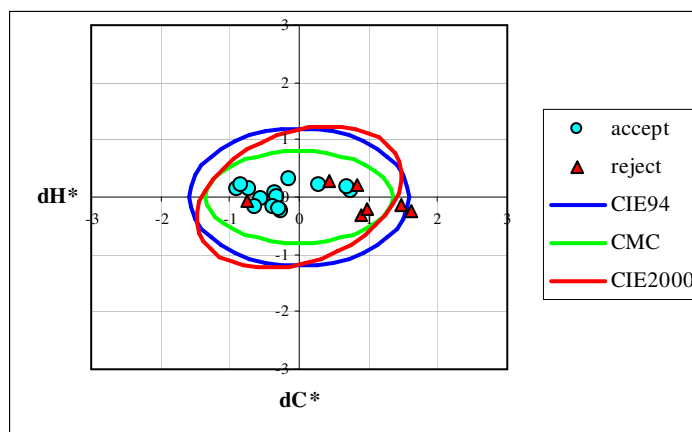
Graf : Toleranční elipsy pro oranžové vzorky s osami dH99 a dC99



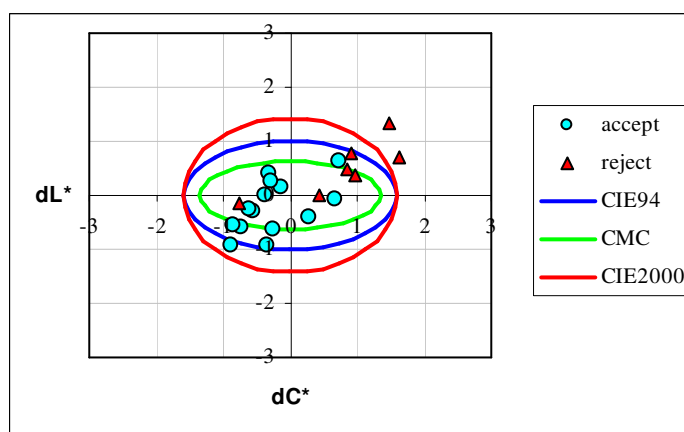
Graf : Toleranční elipsy pro oranžové vzorky s osami dL99 a dC99



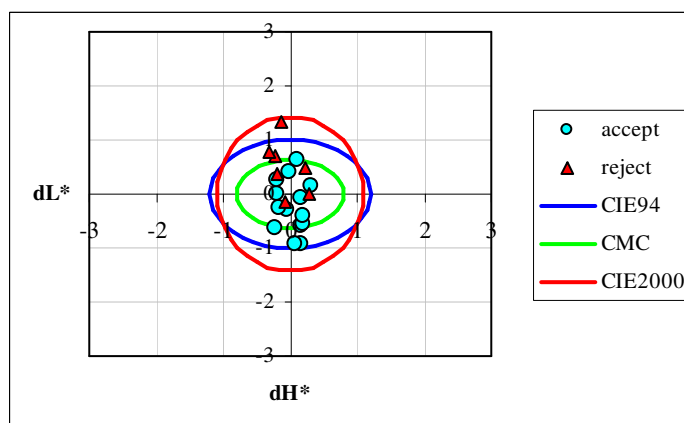
Graf : Toleranční elipsy pro oranžové vzorky s osami dL99 a dH99



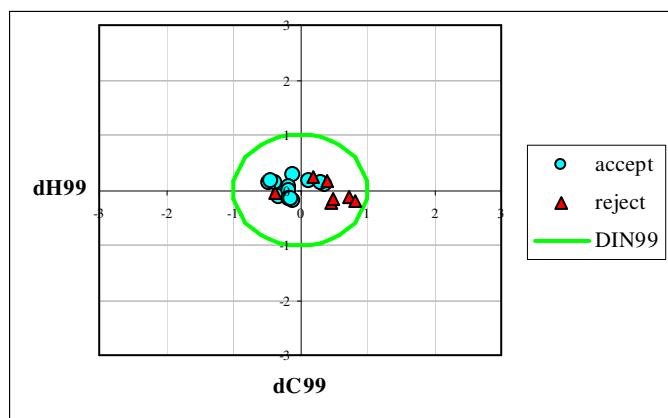
Graf: Projekce modré na chromatické ploše prostoru CIELAB



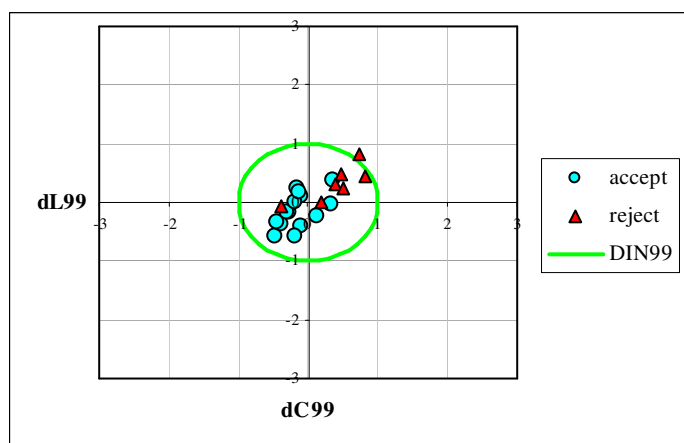
Graf: Projekce modré na chromatické ploše prostoru CIELAB



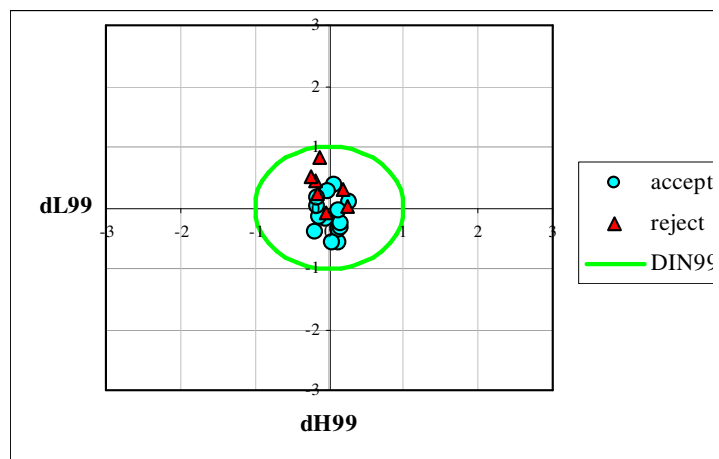
Graf: Projekce oranžové na chromatické ploše prostoru CIELAB



Graf : Toleranční elipsy pro modré vzorky s osami dH99 a dC99



Graf : Toleranční elipsy pro modré vzorky s osami dL99 a dC99



Graf : Toleranční elipsy pro modré vzorky s osami dL99 a dH99